

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estudio sísmico de la estructura del subsuelo en el Museo del Carmen, Ciudad de México

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Emiliano Cortes Reygadas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Martín Cárdenas Soto



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTUDIO SISMICO DE LA ESTRUCTURA DEL SUBSUELO EN EL MUSEO DEL CARMEN, CIUDAD DE MEXICO que presenté para obtener el titulo de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

EMILIANO CORTES REYGADAS
Número de cuenta: 317206931

Agradecimientos

A mis padres, Veronica y Germán por su sacrificio, paciencia y por ser mi mayor ejemplo de dedicación. A mi hermano Hector, por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado. Su amor y confianza han sido fundamentales en este camino.

Al resto de mi familia, por su apoyo, cariño, consejos y palabras de aliento en cada paso de este camino. Su confianza y compañía han sido un pilar fundamental en mi crecimiento.

A Fany, por su amor, comprensión y apoyo incondicional en cada etapa de este proceso. Gracias por estar a mi lado, motivarme en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño logro.

A mis amigos, Uriel, Juan, Jacqueline, Jessica, Paula y Edgar por su apoyo incondicional, su compañía y por hacer de este camino una experiencia más ligera y divertida. Gracias por las risas, las largas conversaciones y por estar ahí en cada desafío y cada logro que obtuvimos siempre juntos.

A mi director de tesis, Dr. Martin Cardenas, por su guía, paciencia y valiosos consejos a lo largo de esta investigación. También al M.I. Jose Antonio Martinez, por su apoyo y enseñanzas, cuya amistad y colaboración fueron clave en este proceso. A la Ing. Thalia Reyes, por conseguir el proyecto y los contactos necesarios para llevarlo a cabo, brindándome la oportunidad de realizar esta investigación. Su apoyo fue fundamental para el éxito de este trabajo.

Este proyecto ha sido apoyado por los proyectos UNAM-DGAPA: PAPIIT IN108124 y PAPIME PE111524.

Resumen

En este trabajo se realizaron estudios de interferometría de ruido sísmico y cocientes espectrales H/V para caracterizar la estructura del subsuelo en el Museo del Carmen. Además se realizó un monitoreo de dos cuerpos del conjunto de edificios a fin de determinar su estado de salud estructural. Los resultados muestran que existe una capa de suelo que moderadamente amplifica (hasta un factor de 3) el movimiento sísmico en la frecuencia de 1.3 Hz. El monitoreo mediante ruido sísmico ambiental muestra que las frecuencias naturales del edificio administrativo y de un salón unido a la iglesia, tienen variaciones diurnas y nocturnas que se atribuyen a cambios en la carga estructural y a las condiciones climáticas. Los resultados muestran que la rigidez estructural varía con el tiempo, lo que puede afectar la respuesta sísmica y el estado de los muros, columnas o vigas de las edificaciones. Estos hallazgos son importantes para evaluar la estabilidad estructural y el riesgo sísmico en edificaciones históricas.

Abstract

This study employed seismic noise interferometry and H/V spectral ratio analyses to delineate the subsurface structure at the Museum of Carmen. Furthermore, two edifices within the complex were observed to evaluate their structural integrity. The findings reveal a soil layer that moderately enhances seismic motion (up to a factor of 3) at a frequency of 1.3 Hz. Monitoring of environmental seismic noise indicates that the natural frequencies of the administrative building and the church hall display diurnal and nocturnal variations, attributed to fluctuations in structural load and climatic conditions. The results indicate that structural stiffness fluctuates over time, influencing the seismic response and the integrity of the building's walls, columns, or beams. These findings are essential for assessing the structural integrity and seismic vulnerability of historical edifices.

Índice general

Agradecimientos I

Resumen II

Abstract III

1. Introducción 1

2. Antecedentes 3

2.1. El patrimonio cultural en México 3

2.2. Estudio actual del riesgo 6

2.2.1. Definición de riesgo 7

2.2.2. Riesgo y peligro sísmico 8

2.3. Contexto geológico 9

2.3.1. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su evolución 10

2.3.2. Geología de la Cuenca de México 12

2.3.3. Geología del Museo del Carmen y su entorno - Suroeste de la Cuenca de México 15

2.4. Métodos de ruido sísmico 17

2.4.1. Método HVSR 20

2.4.2. Interferometría sísmica 22

2.4.3. Instrumentación sísmica para monitoreo sísmico 26

2.5. Inversión de datos geofísicos 27

3. Sitio de estudio y diseño de experimentos 30

3.1. Contexto geoténico y sísmico del entorno del Museo del Carmen 34

3.2. Situación del peligro sísmico en el sitio de estudio 36

4. Procesamiento de los datos **38**

4.1. Procesamiento para Interferometría Sísmica 39

4.1.1. Remoción de la media y tendencia 39

4.1.2. Filtrado del registro 40

4.1.3. Blanqueo espectral (whitening) 42

4.1.4. Apilamiento 43

4.2. Procesamiento para cocientes espectrales 44

5. Resultados **47**

5.1. Cocientes espectrales 47

5.1.1. H/V direccionales 47

5.1.2. H/V tradicional 51

5.2. Correlaciones cruzadas y curvas de dispersión 54

5.3. Inversión de datos 59

5.3.1. Inversión de curvas de dispersión 59

5.3.2. Inversión conjunta 63

5.4. Modelo del subsuelo 65

5.5. Monitoreo sísmico 67

6. Conclusiones y recomendaciones **76**

Bibliografía **78**

Índice de figuras

2.1. Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) en México, dividida en tres sectores: occidente, centro y oriente. Este sistema volcánico es clave para entender la geología y estructura de la Cuenca de México. Tomada de Gómez-Tuena (2005). 11

2.2. Modelo estratigráfico de la Cuenca de México en el que se observan las secuencias volcánicas, depósitos fluviales, aluviales y las diversas sierras, descansando sobre las formaciones marinas. Tomado de Mooser (2018) 13

2.3. Registro conformado por ruido sísmico y un evento sísmico, basado en datos de IRIS. Para estudiar el ruido sísmico, es necesario separarlo del sismo. Fuente: Lucia Gualtieri (2019). 18

2.4. Contribución de elementos que conforman un registro de ruido sismico. Fuente: Sanchez Sesma (2005) 19

2.5. Modelo geológico ideal para la aplicación de la técnica de cocientes espectrales, en el que se encuentra un lecho rocoso que sirve como base de una capa sedimentaria superficial. La impedancia entre las capas resultará en la amplificación de las ondas sísmicas, provocando un efecto de sitio: Kramer (1996) 21

2.6. Representación de la simetría y asimetría de la función de Green en función de las fuentes de ruido. (a) Las fuentes están distribuidas de forma homogénea en el espacio. (b) Distribución no homogénea en el espacio, provocando una asimetría en la función de Green dependiente de la dirección en la que viajan las ondas por la cantidad de fuentes de ruido. Modificada de Stehly (2006) . 25

3.1. Mapa de localización del Museo del Carmen, entidad federativa y alcaldía. . 31

3.2. Mapa representativo de la adquisición de registros de ruido sismico. Las letras asignadas en cada estación indican la posición en altura que tienen; sótano (S), planta baja (A) y segundo piso (C). La clasificación de planta baja contempla tanto las estaciones ubicadas en en los jardines y planta baja de construcciones. 32
3.3. Sismometro Guralp 6T utilizado para las mediciones de ruido sísmico ambiental en distintos puntos del Museo del Carmen. 33
3.4. Mapa de zonificación geotécnica, mostrando la partición de zonas de lago, transición y lomas en Álvaro Obregón. Modificada de Instituto de Ingeniería (2020). 35

4.1. Diagrama de flujo que muestra el preprocesamiento de los registros crudos adquiridos en campo. 39
4.2. Diagrama de flujo sobre el procesado aplicado entre pares registros de ruido sísmico 39
4.3. Remoción de la media y tendencia a una señal de ruido sísmico. 40
4.4. Filtro Buttherworth de dos polos aplicado al registro de ruido sísmico. 41
4.5. Blanqueo espectral aplicado a una señal previamente filtrada con Buttherworth. 42
4.6. Apilamiento (stacking) de una correlación cruzada entre pares de estaciones. 43
4.7. Flujo de trabajo utilizado para procesar los registros de ruido sísmico ambiental, para obtener la razón espectral H/V. 44
4.8. Selección de ventanas de longitud de 40 segundos para un registro de dos horas, obteniendo un total de 209 ventanas. 45
4.9. Ejemplo de cociente espectral sin suavizar (a) y cociente espectral suvizado mediante Konno Ohmachi al 30 % (b). 46

5.1. H/V direccionales de las nueve estaciones que presentan mejor distribución del ruido sísmico para obtener resultados más confiables respecto a la frecuencia fundamental del terreno 49
5.2. Cocientes espectrales comunes donde se observa la función de transferencia promedio (línea negra continua) con su respectiva desviación estándar (linea negra punteada). 52
5.3. Estaciones utilizadas para realizar las correlaciones cruzadas, indicando su nombre, según el lugar donde se ubicarón. 55

5.4. Correlaciones cruzadas entre cinco pares de estaciones distribuidas en el area del Museo del Carmen. 56
5.5. Ejemplo de adquisición de una curva de dispersión en el programa NDCP. Se observa la sección anticausal de la correlación, donde se realiza el picado del modo fundamental. 57
5.6. Curvas de dispersión obtenidas con NCDP a partir de las correlaciones cruzadas. 58
5.7. Inversiones de las curvas de dispersión de cada correlación cruzada entre pares de estaciones. La profundidad de cada modelo de capas varia dependiendo la distancia entre estaciones. 62
5.8. Perfil de velocidades de onda de corte V_s obtenido a partir de la inversión de los resultados del método H/V. 64
5.9. Modelo del subsuelo del Museo del Carmen, los colores muestran la variación de velocidades de onda de corte (Vs). 66
5.10. Muro del edificio administrativo que ha sido resanado (lineas rojas) en otras ocasiones debido a fracturas y derrumbes parciales durante eventos sísmicos . 68
5.11. Espectrograma de la dirección Norte-sur correspondiente a la estación del segundo nivel del edificio administrativo. 69
5.12. Espectrogramas de la dirección Norte-sur de la estación ubicada en el Osario. 69
5.13. Evolución de la frecuencia del edificio administrativo a lo largo del tiempo. Evidente patrón donde la frecuencia aumenta durante los días (recuadro blanco). 70
5.14. Frecuencia natural en la estación ubicada a un costado de la cupula de la iglesia. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día. 71
5.15. Evolución de la frecuencia natural en la estación ubicada en el Osario. . . . 73
5.16. Función de transferencia entre el ultimo nivel del edificio administrativo y el Osario. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día 74
5.17. Función de transferencia entre el costado de la cupula de la iglesia y el Osario. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día 75

Capítulo 1

Introducción

El estudio del patrimonio cultural de México es un trabajo importante debido a la gran extensión del país y, por ende, a la diversidad de culturas que conforman su patrimonio cultural. En los últimos años, la ciencia se ha interesado por el estudio del patrimonio cultural porque se ha considerado que tiene un gran peso histórico y social, como es el caso de la arqueología. Sin embargo, independientemente del tipo de patrimonio cultural del que se trate, su divulgación es indispensable para formar la identidad de la sociedad que lo rodea.

El Museo del Carmen tiene una historia que data de 1615, la cual ha evolucionado hasta la fecha. Actualmente, es considerado un monumento histórico nacional debido a su valor estructural, así como a su contenido cultural y religioso. Por ello, su preservación y cuidado son fundamentales para la divulgación y difusión de la cultura en distintas etapas de la historia de una parte de la Ciudad de México.

Dicho lo anterior, es coherente que el estudio del patrimonio cultural involucre también su preservación y cuidado con el fin de mantener su divulgación y difusión a través de los años. Cabe mencionar, que este rubro es importante en la actualidad, debido a que la mayoría de los patrimonios de cultura que existen se han instaurado en épocas antiguas, tal es el caso del Museo del Carmen que fue construido en 1615.

En el ámbito de la ingeniería, la geofísica desempeña un papel importante en la preservación y exploración de los patrimonios culturales. Los estudios geofísicos pueden contribuir a la conservación de las estructuras consideradas patrimonios culturales al detectar imperfeccio-

nes en ellas y, además, caracterizar el subsuelo sobre el que se asientan para analizar posibles riesgos ante fenómenos naturales que puedan amenazar la integridad de las estructuras y su contenidoz. Asimismo, mediante la exploración geofísica, es posible estudiar la existencia o continuidad de estructuras arqueológicas que forman parte de algún patrimonio cultural.

Los estudios previos que se tienen como base para el estudio del Museo del Carmen respecto al subsuelo indican que el Museo se encuentra en zona de transición, donde existe una capa de suelo aluvial entre 0 y 20 metros de espesor, así mismo, dicha zona tiene amplificaciones máximas de hasta 3 veces con un periodo dominante entre 0.5 y 1 segundos.

Por otro lado, la Ciudad de México dispone de diversos atlas de riesgo que ayudan a identificar zonas de peligro ante la ocurrencia de fenómenos naturales, en este caso el Museo del Carmen se encuentra en una zona clasificada como zona media de riesgo ante la ocurrencia de un sismo con una vulnerabilidad social baja.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el Museo del Carmen carece de estudios específicos enfocados únicamente en el área que abarca, los cuales podrían contribuir a la preservación de la integridad de las instalaciones que albergan su contenido histórico. Utilizando métodos geofísicos de ruido sísmico ambiental, se pretende aportar a la caracterización del subsuelo sobre el cual se asienta el Museo del Carmen, con el propósito de identificar de manera más precisa los riesgos a los que está expuesta el área de estudio, sirviendo así como herramienta para planificar el desarrollo del museo para su preservación y como ayuda para establecer planes de acción ante eventos sísmicos. Además, se busca realizar un análisis básico de las instalaciones del Museo del Carmen para evaluar el estado estructural actual.

Los métodos geofísicos empleados en este estudio incluyen la interferometría sísmica y los cocientes espectrales, ambos basados en el análisis del ruido sísmico ambiental.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. El patrimonio cultural en México

El patrimonio cultural de México es el resultado de la amplia variedad de tradiciones, comportamientos y valores que existen en el país, reflejados en distintas áreas geográficas con características particulares. Este patrimonio se ha formado a lo largo de la historia de México, con elementos específicos como la religión, la lengua, las creencias, la arquitectura, los rituales y las artes.

La preservación del patrimonio cultural en México es de suma importancia para poder transmitir, difundir y compartir los orígenes del país con aquellos interesados en conocer y comprender nuestro pasado y presente como mexicanos. La conservación de zonas geográficas y sus culturas, representa un reto, ya que muchas de ellas fueron constituidas en épocas prehispánicas, o bien coloniales, y las estructuras que las conforman se han desgastado y descuidado con el tiempo.

Para conservar los patrimonios culturales en México se debe hacer un análisis de fenómenos perturbadores que pueden afectarlos. Considerando el contexto que se vive en México, uno de estos fenómenos perturbadores son los sismos que han afectado la infraestructura de la cuenca de México durante varios siglos, por ello, se considera que el estudio del riesgo ante este tipo de fenómenos es esencial para poder aproximar o estimar el nivel de exposición de las estructuras consideradas patrimonio cultural ante dichos fenómenos y poder prevenir de alguna forma los posibles daños que puedan sufrir.

En el mundo existen más de 1150 sitios considerados patrimonios culturales de la humanidad, de los cuales 35 son de México, esto hace a México el país de Latinoamérica con más patrimonios culturales, por lo tanto, es importante el estudio y análisis de estos sitios con el fin de preservarlos.

El Museo del Carmen fue construido a partir del año 1615 en un establecimiento indígena llamado Tenanitla. Un año después de su asentamiento en 1616, tuvo como primer función ser un colegio en el cual recibieron estudiantes hasta el año de 1658. Posteriormente, al haber sido una de las más bellas fundaciones carmelitas novohispanas, se decidió que sería la sede trienal de los capítulos provinciales por los siguientes 242 años; sin embargo, al pasar este periodo sufrió una desintegración que desencadeno el abandono y fragmento de los edificios por un largo tiempo.

Si bien es cierto que el convento fue abandonado durante varias décadas, esto no fue suficiente para acabar por completo con su historia, a pesar de esto, sobrevivieron algunos lienzos y esculturas al paso del tiempo. Aunada a esta situación, se creó el Museo del Carmen en 1929 fundado por Jorge Enciso Alatorre, enriquecido por piezas del antiguo colegio carmelita y procedentes del Castillo de Chapultepec, Museo Histórico de Churubusco y algunas otras que vienen de la custodia del INAH.

El Museo del Carmen, no está dentro de la lista de patrimonios culturales de la actualidad; sin embargo, En 1932 después de su fundación fue declarado monumento historico nacional por su contenido cultural, estructural y religioso que forma parte de la historia de nuestro país. Uno de los principales objetivos del Museo del Carmen es la preservación del patrimonio y la investigación, cabe señalar que se considera importante la conservación y valorización del edificio que lo aloja, el cual es considerado el monumento histórico del siglo XVII.

Actualmente este museo presenta fracturas y se ha reportado por las personas encargadas de distintas situaciones administrativas del Museo que existen bastantes muros en distintas partes del Museo con presencia de humedad, lo cual podría deberse a la antigüedad de los materiales con los que fue construido y con su capacidad de retener agua.

En la sección previa se destacó la importancia de conservar el patrimonio cultural, considerándolo un aspecto esencial. De acuerdo con Gaffney y Gater (2003), el uso de métodos no destructivos resulta crucial para investigar y preservar dicho patrimonio [Gaffney et al., 2003]. Los métodos que comunmente se utilizan son los métodos geofísicos, los cuales son una herramienta valiosa para evaluar el estado actual del sitio y prevenir posibles riesgos. En la tabla 2.1, se presenta una clasificación de las técnicas geofísicas.

Métodos no destructivos	**Métodos destructivos**
Georradar (GPR)	Perforación de pozos
Prospección magnética	Sondeos mecánicos
Resistividad eléctrica	
Métodos electromagnéticos	
Sondeos sísmicos	

Tabla 2.1: Clasificación de métodos de exploración

Las técnicas no destructivas nos permiten obtener información del subsuelo para conocer su composición y características, sin la necesidad de realizar perforaciones, explosiones o cualquier acción que comprometa la seguridad e integridad del recinto.

En consecuencia, este estudio empleará métodos sísmicos no destructivos con el propósito de obtener información detallada sobre el estado actual del subsuelo, lo cual permitirá evaluar su comportamiento frente a un evento sísmico.

Se considera que el uso de estas técnicas, especialmente en zonas consideradas patrimonio cultural en un país sísmicamente activo, puede contribuir significativamente al desarrollo de planes de emergencia y estrategias de conservación específicas. De ahí la importancia de estudiar y analizar los riesgos a los cuales son vulnerables estos sitios. Sin embargo, los métodos geofísicos no solo se utilizan para preservar el patrimonio cultural, sino también para identificar extensiones o nuevos elementos que lo conforman y que no son visibles a simple vista, como túneles de acceso, nuevas estructuras, entre otros.

Con todo lo mencionado hasta el momento, cabe destacar que la preservación del patrimonio cultural en México contribuye de manera significativa a la economía del país, dado que

México posee una alta actividad turística gracias a la diversidad de culturas, tradiciones y sitios geográficos que ofrece.

2.2. Estudio actual del riesgo

En la actualidad el análisis de riesgos ha cobrado relevancia, debido a diversos factores como: el crecimiento y desarrollo poblacional, cambio climático, etc. Sin embargo, el análisis de riesgos es importante especialmente en zonas con alta densidad poblacional, como es el caso de la Ciudad de México.

El Gobierno de la Ciudad de México ha notado la importancia de realizar estudios relacionados con los riesgos que existen en la ciudad, ya que se encuentra ubicada en una zona que está expuesta a fenómenos perturbadores que amenazan la integridad de la población y sus bienes, tomando en cuenta esta condición, el gobierno realizó un atlas de riesgo por cada alcaldía que se encuentra en la ciudad.

Debido a que nuestra zona de estudio se encuentra ubicada en la alcaldía Álvaro Obregón, ya se tiene un antecedente del análisis de riesgos [Gobierno de la Ciudad de México, 2020] realizado por el gobierno de la ciudad, dicho análisis es plasmado en lo que se conoce como Atlas de Riesgo. Este documento tiene como principal objetivo identificar y analizar los riesgos de origen natural a los cuales se encuentra sometido el municipio y es una poderosa herramienta para prevenir o disminuir la vulnerabilidad de los asentamientos urbanos que podrían ser afectados y en algunos casos, aminorar las amenazas que provocan los peligros naturales [Ruiz Rivera et al., 2015].

La alcaldía de Álvaro Obregón cuenta con un atlas de riesgos y peligros con una última actualización en el año 2020. En esta última actualización se identificaron distintos tipos de riesgos que se encuentran en diferentes categorías y que se mencionan a continuación:

1. **Geológico**: Son aquellas amenazas que incluyen los hundimientos, movimientos gravitacionales, sismos, agrietamientos, inestabilidad de laderas, caída de ceniza volcánica, derrumbes y lluvia ácida.

2. **Hidrometeorológico**: En esta categoría entran los peligros relacionados con el clima

extremo o acción violenta del comportamiento atmosférico, por ejemplo: inundaciones, viento, heladas, lluvias extremas, ondas cálidas, etc.

3. **Socio-Organizativo**: Está enfocado en aquellos fenómenos perturbadores que involucran grandes cantidades de personas, como: accidentes viales, asentamientos irregulares, mítines sociales, mercados sobre ruedas, saturación de vialidades e índices delictivos.

4. **Químico-Tecnológicos**: Principalmente de origen antropogénico, ya que se refieren a fenómenos que desencadenan una acción violenta debido a su interacción química y que generan consecuencias destructivas

5. **Sanitario-Ecológico**: Descrito como peligros asociados a fenómenos que promueven agentes biológicos que ponen en riesgo la salud de la población

Considerando que el Museo del Carmen se encuentra en la alcaldía de Álvaro Obregón en la ciudad de México, es evidente señalar la importancia que puede tener el peligro sísmico, tomando en cuenta que México es un país sísmicamente muy activo, debido al régimen tectónico que se tiene en la costa del océano pacífico.

2.2.1. Definición de riesgo

El riesgo se puede definir como la posibilidad de ocurrencia de un evento amenazador, derivado por un fenómeno perturbador que provoca un desastre. Sin embargo, al concepto anterior se le atribuyen dos variables; vulnerabilidad y peligro. Si bien, los desastres de distintos índoles pueden ocurrir en cualquier lugar, no representarían un problema si ocurrieran donde no existe una población o pérdida de vidas y bienes; es decir, si existe un peligro pero no existen asentamientos humanos o sistemas expuestos que estén vulnerables ante este peligro, no existe el riesgo.

Por un lado, la vulnerabilidad siempre estará relacionada con una amenaza que puede ser de origen físico hasta de origen laboral [Ruiz Rivera, 2012]. En el ámbito de amenazas físicas que atañen a la población, el cual es el caso de estudio de este trabajo, el cálculo de vulnerabilidad de un asentamiento urbano se requiere conocer las características que lo hacen más

o menos propenso ante dicha amenaza, es decir, que tan susceptible es ante la ocurrencia de una amenaza especifica.

El peligro y su análisis, se refieren a la identificación de posibles fenómenos perturbadores, así como su frecuencia de ocurrencia y las condiciones comunes en las que se da [Ogura and Soares Macedo, 2005].

Con todo lo anterior, el análisis de riesgos es una técnica que intenta cuantificar el peligro de un fenómeno perturbador (de origen natural o de origen antropogénico) con la posibilidad de su ocurrencia, así como la vulnerabilidad de las zonas de importancia que se verían involucradas en su ocurrencia.

2.2.2. Riesgo y peligro sísmico

En el caso del riesgo sísmico, este depende de un factor adicional, es decir, depende de tres factores principales: bienes expuestos (C), que podrían referirse a los asentamientos humanos, vidas o cualquier sistema expuesto, vulnerabilidad (V) que recordemos está relacionado con la susceptibilidad a ser afectado; y el peligro (P) que sustenta la posibilidad de ocurrencia de un evento sísmico [Gutiérrez Martínez et al., 2006]. Dicho esto, podemos definir la ecuación resultante para calcular un riesgo por sismo.

$$R = C \cdot P \cdot V. \tag{2.1}$$

La justificación y motivación de incluir la variable de bienes expuestos (C) para el calculo del riesgo es derivada del aumento de perdidas materiales y humanas a medida del paso del tiempo por el crecimiento de la mancha urbana en el país, ademas de un incremento en la frecuencia de ocurrencia de los peligros.

En relación con lo expuesto anteriormente, la vulnerabilidad con respecto a un evento sísmico ha crecido, sobre todo en la Ciudad de México donde la expansión metropolitana ha llevado a asentar estructuras en zonas donde existe un mayor riesgo ante la presencia de un evento sísmico. Sin embargo, la vulnerabilidad en este escenario y enfocándose en la respuesta de los asentamientos ante la ocurrencia de este fenómeno, puede ser mitigada o

suavizada a través de la mejora en la calidad de los materiales utilizados en los asentamientos [Gutiérrez Martínez et al., 2006]. Cabe señalar, que la frecuencia de ocurrencia de un sismo no tiene mucha variabilidad, sino que está sujeta a los patrones ya definidos en el pasado geológico.

En cuanto a la estimación de peligro sísmico, es una metodología compleja ya que se requiere un sólido contexto geológico de la zona, como el conocimiento de fallas sismogénicas para establecer periodos de retorno, así como contar un catálogo completo y confiable para analizar la frecuencia de diferentes tipos de sismos. El peligro sísmico se podría definir como la posibilidad de que se sobrepase un nivel de intensidad ante la eventualidad de un sismo, dicho nivel será representado mediante mapas que muestren la distribución de valores máximos de aceleración, desplazamiento y velocidad.

Un parámetro importante que debe tomarse en cuenta al realizar un análisis de peligro y riesgo sísmico es recabar la información necesaria para establecer periodos de retorno asociados a intensidades que hayan causado con anterioridad daños a estructuras en la zona de interés. Sin embargo, también deben tomar en cuenta otros fenómenos perturbadores que puede influir en este tipo de peligro, como la licuación de arenas y tsunamis, así como una buena cobertura en cuanto a la distribución de instrumentación sísmica que ayuda a analizar los parámetros ya mencionados con respecto al nivel de peligro.

2.3. Contexto geológico

El entorno natural del Valle de México ha desempeñado un papel fundamental en su desarrollo a lo largo de la historia. Las características del suelo y subsuelo han influido significativamente en la expansión urbana y en la dinámica social de la región. En este capítulo, se recopilarán los aspectos geológicos más relevantes que han modelado las condiciones actuales del Valle de México, proporcionando una base para comprender los riesgos naturales a los que puede enfrentarse en la actualidad.

2.3.1. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y su evolución

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es una zona geológicamente activa, situada en el suroeste de la placa de Norteamérica. Se extiende desde las costas del Pacífico en San Blas, Nayarit, y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz [Gómez-Tuena et al., 2005]. La FVTM es un arco magmático compuesto por estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos. Este arco se divide en tres porciones principales: occidental, central y oriental (Figura 2.1), cada una con formas de volcanismo y composiciones químicas distintas.

Este arco magmático es el resultado del régimen convergente entre las placas de Rivera y Cocos respecto a la placa de Norteamérica. La FVTM no ha evolucionado de manera homogénea a lo largo de su historia; está formada por distintos pulsos volcánicos que la han modelado, y sus características petrológicas y geoquímicas han cambiado a lo largo de estos periodos. De forma simplificada, la evolución de la FVTM se puede dividir en cuatro etapas distintas.

La primera etapa corresponde al Mioceno medio y tardío. Durante este periodo, la actividad volcánica formó un arco volcánico principalmente en la parte central de la FVTM. Las estructuras que conforman este arco volcánico, con una dirección preferencial E-W, incluyen lo que hoy se conoce como la Sierra de Mil Cumbres, la Sierra de Angangueo, Tenancingo, Malinalco, así como las rocas más profundas en el relleno de la Ciudad de México (Ferrari, et al., 2003). La composición geoquímica de las rocas en esta etapa es en su mayoría similar a las adakitas, un tipo de roca ígnea que comúnmente se forma en zonas de subducción a partir de la fusión parcial de la placa subducida. Estas rocas, descritas por Suzanne Kay en 1978, se caracterizan por su baja porosidad, alta resistividad mecánica y alta densidad.

Debido a la composición química y al tipo de rocas generadas en este periodo, se sugiere que la placa subducida tenía un bajo ángulo o era subhorizontal. Esto también se reflejaba en el alejamiento progresivo del arco magmático con respecto a la trinchera [Gómez-Tuena et al., 2005].

La segunda etapa comienza en el Mioceno tardío, caracterizada por un magmatismo extenso y predominantemente máfico. Las estructuras formadas durante este periodo son principal-

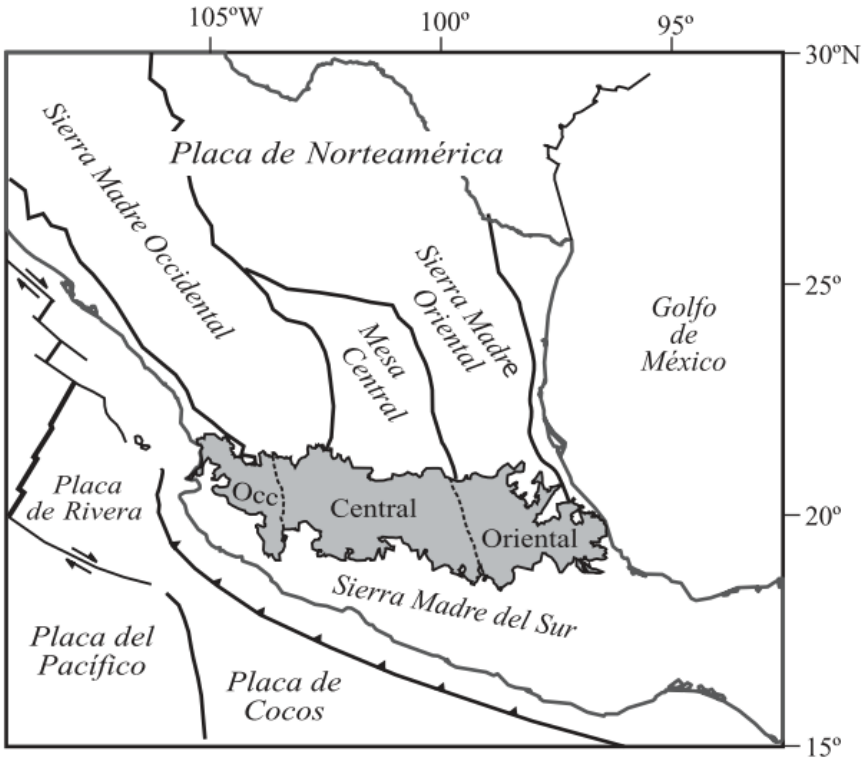


Figura 2.1: Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) en México, dividida en tres sectores: occidente, centro y oriente. Este sistema volcánico es clave para entender la geología y estructura de la Cuenca de México. Tomada de Gómez-Tuena (2005).

mente mesetas basálticas, emplazadas en fisuras [Ferrari, 2000]. Este episodio se extendió desde la costa de Nayarit hasta la costa de Veracruz, al norte del arco magmático descrito en la primera etapa.

La última etapa del Mioceno tardío y el comienzo del Plioceno temprano dieron lugar a la tercera fase que conformó la FVTM. En la parte final del Mioceno tardío, comenzó un vulcanismo silícico al sur de la actividad máfica anterior. Este episodio se caracterizó por la formación de domos riolíticos y dacíticos, así como por importantes volúmenes de ignimbritas [Gómez-Tuena et al., 2005]. Este evento fue más notable y significativo en la porción occidental de la FVTM. Sin embargo, el vulcanismo silícico fue modificado en el Plioceno temprano por un vulcanismo bimodal, caracterizado por coladas de basaltos alcalinos, así como domos e ignimbritas silícicas.

Durante este mismo episodio, en la parte central de la FVTM destacaban las tobas pumicíticas e ignimbritas, formadas por grandes calderas.

Finalmente, la última etapa que conformó la FVTM tuvo lugar en el Plioceno tardío y Cuaternario, donde el episodio bimodal descrito anteriormente fue reemplazado, prácticamente en toda la faja volcánica, por un vulcanismo andesítico-basáltico. También durante el Cuaternario se formaron la mayoría de los estratovolcanes en la parte central de la FVTM, que se conocen hoy en día y que tienen una edad inferior a 1 Ma.

Para los fines de este trabajo, es importante resaltar que la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es la región volcánica que ha influido significativamente en la Cuenca de la Ciudad de México. La actividad volcánica en esta zona, resultado de la convergencia de placas tectónicas, ha dado lugar a la formación de volcanes, lo que ha generado una geología compleja que impacta la estabilidad del suelo y la sismicidad de la cuenca.

2.3.2. Geología de la Cuenca de México

La Cuenca de México se encuentra ubicada en la parte central-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Es considerada una gran altiplanicie lacustre, comprendida entre sierras volcánicas, abanicos y llanuras aluviales [Lugo-Hubp, 1990]. De manera más específica, la Cuenca de México abarca la zona de la Ciudad de México y gran parte del Estado de México, como se conocen hoy en día.

Las sierras volcánicas que rodean la Cuenca de México tienen edades que varían entre el Oligoceno y el Mioceno. Sin embargo, la cuenca actual está formada por elementos geológicos que abarcan desde el Oligoceno hasta el Cuaternario, ya que la erosión de las sierras volcánicas ha depositado sedimentos lacustres y aluviales en las zonas más bajas de la cuenca.

La evolución de la Cuenca de México es compleja, pero se remonta al Cretácico, periodo en el que predominaba la sedimentación marina calcárea con depositos marinos de lutitas y calizas, actualmente a 1500 y 3000 metros de profundidad [Mooser, 2018]. Esto sugiere que la Cuenca de México se encuentra sobre capas plegadas de origen marino [Vazquez and Jaimes, 1989].

Los 60 millones de años posteriores al plegamiento de las calizas y lutitas del Cretacico superior, surgió una intensa actividad volcánica que originó las rocas volcánicas que actual-

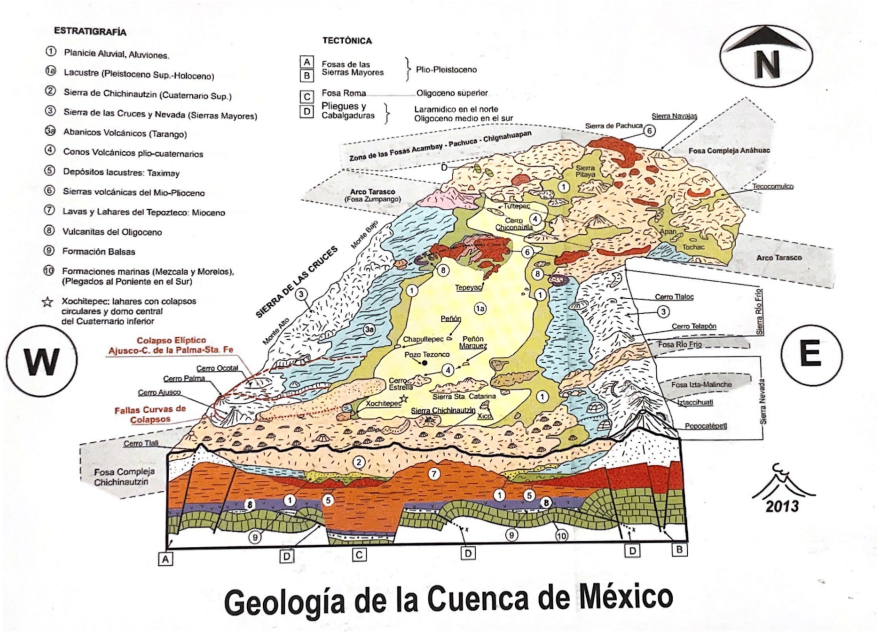


Figura 2.2: Modelo estratigráfico de la Cuenca de México en el que se observan las secuencias volcánicas, depósitos fluviales, aluviales y las diversas sierras, descansando sobre las formaciones marinas. Tomado de Mooser (2018)

mente conforman el subsuelo de la cuenca y que se ven reflejadas en brechas, tobas, cenizas, lahares, depósitos fluviales y aluviales, paleosuelos y arcillas, acumulando un total de 1500 a 3000 metros de espesor [Mooser, 2018]. Los aparatos volcánicos formados en ese periodo, junto con los abanicos aluviales (rocas vulcanoclásticas) generados por su colapso, experimentaron procesos de erosión durante los periodos de precipitaciones fluviales y glaciaciones [López Martínez, 2024]. Estos procesos sirvieron como fuente de material sedimentario que fue transportado hacia la cuenca, contribuyendo al relleno de la misma.

Entre las sierras que favorecieron el relleno de la cuenca se encuentran la Sierra de Tezopotlán, la Sierra de Monte Alto y Bajo, la Sierra de Pachuca, la Sierra Nevada, la Sierra de las Cruces, así como las sierras del Ajusco y Chichinautzin. Estas sierras dieron origen a los lagos de Texcoco, Xochimilco, Zumpango, Tláhuac y Xaltocan. Posteriormente, se formaron estructuras jóvenes derivadas de la actividad tectónica y volcánica, como el Cerro de la Estrella y el Peñón de los Baños.

Durante la investigación geológica realizada a lo largo de los años sobre la Cuenca de México, se han identificado al menos cinco sistemas de fallas principales. Cada uno de estos sistemas ha surgido en diferentes episodios a lo largo de la evolución de la cuenca [Mooser, 2018]. Estos

sistemas de fallas son provocados por la actividad tectónica y son importantes de considerar, ya que pueden generar sismicidad local, amplificación de ondas, hundimientos, subsidencias y deslizamientos, lo que representa riesgos significativos para la infraestructura y la sociedad en algunas zonas de la cuenca.

Los sistemas de fallas presentes en la cuenca con sus direcciones preferenciales son: Sistema Chichinautzin-Santa Catarina (WSE-ENE), Sistema Grandes Sierras y Fosas (NNW-SSE), Sistema Tláloc-Apan (SW-NE), Sistenma Tarasco-Acambay-Zumpango (WNW-ESE), Pliegues laramídicos y Pliegues Xolapa

Como ya se mencionó anteriormente, la base sobre la que descansa la Cuenca de México data del Cretácico. Posteriormente, debido a procesos de actividad volcánica durante el Eoceno, se produjeron depósitos de tobas y brechas con espesores de hasta 2 km. Más tarde, en el Mioceno temprano, ocurrió un episodio de actividad tectónica que generó fracturamientos en la cuenca con orientaciones típicas E-W [Tapia-Varela and López-Blanco, 2002]. Durante este mismo periodo, continuaron las erupciones volcánicas, que dejaron estratos con un espesor promedio de 600 metros, compuestos principalmente de andesitas y dacitas.

Más tarde, en el Mioceno tardío, los procesos volcánicos dieron origen a la Sierra de Guadalupe, la Sierra de Río Frío, Sierra Nevada y Tepozteco cerrando la porción norte de la cuenca. Esto provocó que el flujo hídrico adquiriera una orientación principal hacia el sureste, transportando material en esta dirección y contribuyendo al relleno de partes de la planicie de la cuenca.

El episodio magmático del Pleistoceno ocurrió en la parte poniente de la cuenca, dando lugar a la formación de los volcanes de San Miguel, La Palma y Otomí. Asimismo, las emisiones volcánicas, principalmente piroclásticas, dieron origen a la Sierra de las Cruces. En el Pleistoceno tardío ocurrió un depósito de rocas basálticas y piroclastos como resultado de un episodio magmático que dio origen a la Sierra del Ajusco, Chichinautzin y la Sierra de Santa Catarina, en la porción sur de la cuenca [López Martínez, 2024].

En la parte inferior de las sierras mayores se pueden encontrar grandes abanicos volcánicos;

sin embargo, en el caso de la Sierra de Guadalupe, los abanicos presentan una menor extensión, lo cual es consecuencia de las rocas pertenecientes a la Formación Tarango.

En el Cuaternario también se registraron episodios magmáticos en la parte central de la cuenca, que dieron lugar a la formación de domos volcánicos como el Cerro de la Estrella y el Peñón de los Baños. De igual manera, la actividad magmática durante este periodo dejó grandes cantidades de andesita y basalto, que destacan en formaciones como el Cerro de Chimalhuacán, Cerro Gordo y El Pino [Tapia-Varela and López-Blanco, 2002].

Finalmente, una vez establecida y asentada la Cuenca de México, se produjo un cambio climático que desencadenó la formación de glaciares en las zonas altas de las sierras. Esto, junto con la precipitación y otros factores, provocó la propagación de ríos a través de las estructuras volcánicas, rellenando la cuenca con depósitos fluviales y aluviales [López Martínez, 2024], los cuales dominan en la parte superficial de la cuenca en la etapa más joven del Cuaternario.

2.3.3. Geología del Museo del Carmen y su entorno - Suroeste de la Cuenca de México

El Museo del Carmen se ubica en la parte occidental de la Cuenca de México. Según el estudio realizado por Mooser (2018), el museo está asentado sobre una capa superficial de aluviones cuaternarios. En sus alrededores se encuentran estructuras geológicas de importancia, como la Formación Tarango al oeste, los basaltos lávicos del Xitle hacia el sur, la Sierra de las Cruces al suroeste y depósitos lacustres en dirección este.

Por otro lado, la información del subsuelo es limitada; sin embargo, según la secuencia estratigráfica establecida por Mooser (2018), se cree que debajo del depósito aluvial existe una capa espesa compuesta por suelos con arenas, gravas y boleos. Esta capa está intercalada con estratos muy delgados de pómez y cenizas feno-basálticas. Finalmente, se alcanza la base que corresponde a los pies profundos de la Formación Tarango.

Sierra de las Cruces

La Sierra de las Cruces comenzó su formación durante el Plioceno tardío y se extendió hasta el Holoceno. Esta formación se considera un conjunto de tres estratovolcanes alineados con

una orientación típica N-S [Vazquez and Jaimes, 1989]. Las rocas volcánicas que conforman esta sierra corresponden a secuencias de lavas efusivas con brechas en la parte alta de la sierra, que comúnmente culminan en domos volcánicos de andesitas.

Esta formación cubre las rocas extrusivas del Mioceno medio a tardío, así como las rocas del Plioceno temprano, las cuales experimentaron una discordancia erosional [Vazquez and Jaimes, 1989]. Asimismo, la Sierra de las Cruces está cubierta en distintas zonas de su perímetro por depósitos aluviales y lacustres.

Formación Tarango

Las dataciones isotópicas de esta formación sugieren que su edad se remonta al Plioceno tardío y está ubicada en la zona de lomas. Esta unidad está representada por lahares que contienen biotitas; en profundidad, esta formación llega a tener contacto con las lavas del Cerro de la Estrella [Mooser, 2018].

La Formación Tarango está cubierta por depósitos lacustres y aluviales que se extienden igualmente hasta la parte oeste del Cerro de la Estrella. Además de los lahares, la formación está compuesta por rocas vulcanoclásticas y secuencias intercaladas de conglomerados, cenizas, arcillas y tobas líticas [López Martínez, 2024].

Lavas del Xitle

El volcán Xitle pertenece al campo volcánico Chichinautzin, el cual se formó durante el periodo Cuaternario [Cervantes-Solano et al., 2019]. Las lavas del Xitle se emplazaron alrededor del campus de Ciudad Universitaria. Las rocas ígneas extrusivas que conforman estos emplazamientos son principalmente basálticas, y dentro de esta unidad se observan formaciones de domos, como es el caso de la Colonia Zacatépetl.

Depositos aluviales

Durante el Cuaternario se formaron los grandes depósitos aluviales en la Cuenca de México, los cuales son consecuencia de los procesos glaciares y postglaciares. Esta unidad se manifiesta en forma de llanuras y se ha depositado como resultado del transporte de sedimentos

a través de ríos que han cambiado de rumbo o debido a episodios de inundaciones.

La composición de estos depósitos se basa en material poco consolidado que varía en tamaño, incluyendo grava, arena, limos y arcilla [Vazquez and Jaimes, 1989]. Es importante señalar que esta unidad contiene sedimentos provenientes de las formaciones previamente descritas, los cuales son el resultado de su erosión. En cuanto a la profundidad de esta unidad, es variable, pero se puede inferir que, dado que el Museo del Carmen se encuentra cercano a las unidades de la Formación Tarango y a las lavas del Xitle, su espesor no supera los 50 metros. No obstante, a medida que se avanza hacia el centro de esta unidad, el espesor tiende a aumentar.

2.4. Métodos de ruido sísmico

En los inicios de la historia de la sismología, se creía que el ruido sísmico era la parte de una señal sin utilidad, que debía ser eliminada para obtener resultados confiables, por lo que simplemente se desechaba. Sin embargo, en 1957, el geofísico japonés Keiiti Aki introdujo un método geofísico llamado SPAC (Spatial Autocorrelation Method), en el que utilizaba el ruido sísmico para obtener información del subsuelo, sentando así las bases para el uso del ruido sísmico de microtremores.

En México, el estudio del ruido sísmico cobró mayor relevancia cuando se comprobó su utilidad para la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, el análisis de estructuras civiles e incluso la anticipación de erupciones volcánicas. Estas vibraciones de baja intensidad que componen el ruido sísmico, son producidas tanto por fenómenos naturales como por actividades humanas, revelan datos clave sobre las propiedades dinámicas del subsuelo y las construcciones. Técnicas como la interferometría sísmica y el método espectral H/V han sido una parte importante para el inicio de este avance, ya que permiten desde evaluar las características del terreno hasta monitorear edificios o vigilar volcanes activos, a partir del ruido sísmico ambiental.

Llamamos indistintamente ruido sismico ambiental al registro temporal continuo (Figura 2.1) de un sismógrafo que no contiene eventos sísmicos tales como explosiones o terremotos

[Gaite Castrillo, 2013]. Esta parte del registro temporal al cual llamamos ruido sísmico esta compuesto principalmente por ondas superficiales, lo que lo hace útil para determinar las propiedades del subsuelo.

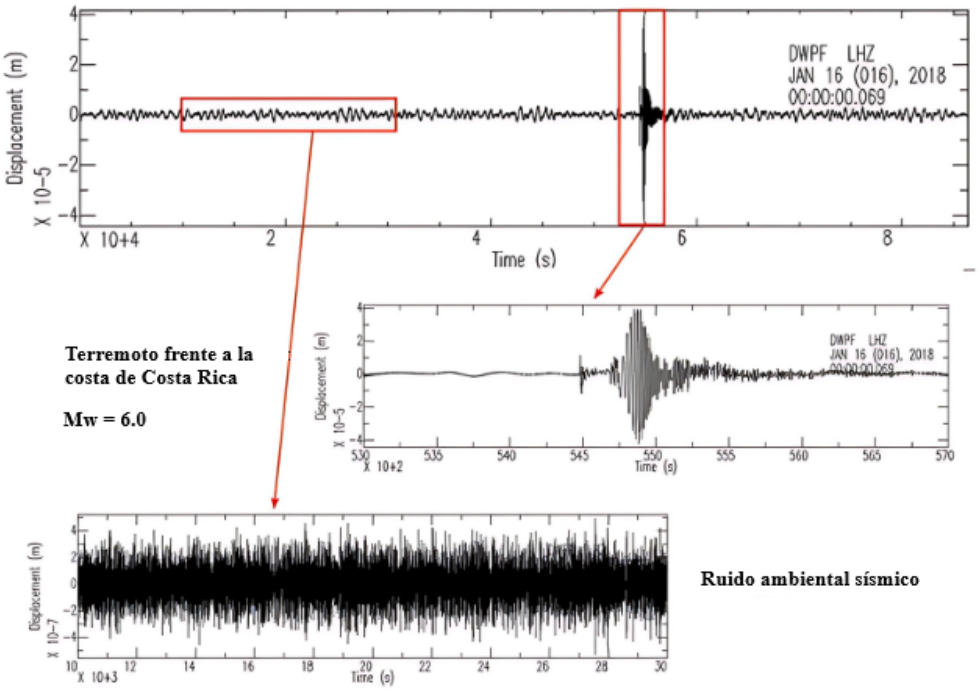


Figura 2.3: Registro conformado por ruido sísmico y un evento sísmico, basado en datos de IRIS. Para estudiar el ruido sísmico, es necesario separarlo del sismo. Fuente: Lucia Gualtieri (2019).

Se comenzaron a desarrollar distintos métodos en los que el ruido sísmico se utilizara como elemento principal, debido a su fácil adquisición y bajo costo. Además, el uso de este recurso presenta ventajas físicas frente a otros métodos geofísicos. Por ejemplo, las ondas superficiales se extraen fácilmente de estos registros, ya que el ruido sísmico es excitado preferentemente por fuentes naturales (Figura 2.4), como microsismos oceánicos, perturbaciones atmosféricas, trafico vehicular, viento y actividades de la industria [Stehly et al., 2006].

Las ondas superficiales son esas vibraciones que viajan por la capa más externa de la Tierra y, a diferencia de las ondas de cuerpo, se mueven más lento. Básicamente existen dos variedades: las ondas Rayleigh y las Love, cada una con su propio estilo de movimiento en el terreno [Kramer, 1996].

Las ondas Rayleigh hacen que el suelo describa una especie de elipse hacia atrás como cuando

se lanza una piedra al agua, mezclando movimientos hacia arriba y abajo con oscilaciones en la dirección de la propagación. Como logran profundizar un poco mas bajo tierra, a la geociencia les resulta útil para entender cómo se comporta el subsuelo.

Las ondas Love son más sencillas en su movimiento; solo producen movimientos del terreno de lado a lado, como si fuera un látigo horizontal. Aparecen cuando las ondas chocan con capas blandas cerca de la superficie, y su velocidad delata qué tan rígidos son los materiales que atraviesan, por eso son clave para mapear el subsuelo.

Para analizar el ruido sísmico, resulta clave el concepto de campo difuso, que describe cómo las ondas sísmicas tras múltiples dispersiones causadas por la heterogeneidad del subsuelo pierden su dirección original. Según la teoría de campos difusos (Sánchez-Sesma et al., 2015), cuando las ondas interactúan repetidamente con irregularidades del medio, su energía se redistribuye de forma homogénea, propagándose uniformemente en todas direcciones (isotrópicamente) sin depender de una fuente única.

En estas condiciones, cada punto del medio se comporta como un emisor secundario, creando un patrón de ondas complejo pero con características estadísticas predecibles. Este principio es la base de técnicas que aprovechan el ruido ambiental para obtener imágenes del subsuelo sin necesidad de fuentes sísmicas controladas.

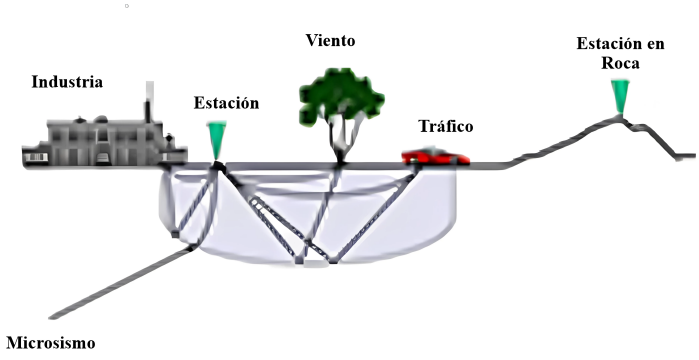


Figura 2.4: Contribución de elementos que conforman un registro de ruido sismico. Fuente: Sanchez Sesma (2005)

Con lo anterior, se puede afirmar que el ruido sísmico ambiental es muy útil para producir

tomografías sísmicas con la ayuda de ondas superficiales, monitoreos de seguridad en estructuras civiles y para la ingeniería sísmica en general, ya que está compuesto principalmente por ondas Rayleigh y Love (ondas superficiales).

2.4.1. Método HVSR

Cuando ocurre un sismo, la respuesta del suelo depende de distintos factores, entre ellos la distancia al epicentro y de los efectos locales del suelo. Esto puede reflejarse en la amplificación de las ondas. Como su nombre indica, la amplificación de las ondas sísmicas se refiere al incremento de su amplitud, y comúnmente esta amplificación es la responsable de provocar daños severos en los inmuebles.

El método de cocientes espectrales H/V consiste en la medición de ruido sísmico o microtremores para determinar efectos de sitio, mediante el periodo fundamental de la capa de suelo superficial que se encuentra por encima del lecho rocoso (Figura 2.5). La técnica de H/V también se basa en el concepto de función de transferencia, que explica matemáticamente cómo una señal de entrada pasa a través de un sistema y se transforma en una señal de salida.

La función de transferencia expresa, en términos físicos, cómo las ondas sísmicas que se encuentran en el lecho rocoso se amplifican o atenúan al pasar a través depósito de suelo.

Este método se basa en algunas hipótesis que lo sustentan, las cuales se presentan a continuación.

1. La fuente es el ruido sísmico, el cual contiene principalmente ondas S (ondas superficiales).

2. El impacto de la fuente se reduce al dividir las amplitudes del espectro de vibraciones ambientales horizontales entre las verticales.

3. La relación espectral H/V representa la función de transferencia de las ondas entre la superficie y el fondo de la capa sedimentaria.

De este modo, la técnica propuesta por Nakamura busca remover los efectos producidos por las ondas Rayleigh, de manera que la función de transferencia queda determinada por las

ondas de cuerpo S [Giolo et al., 2019].

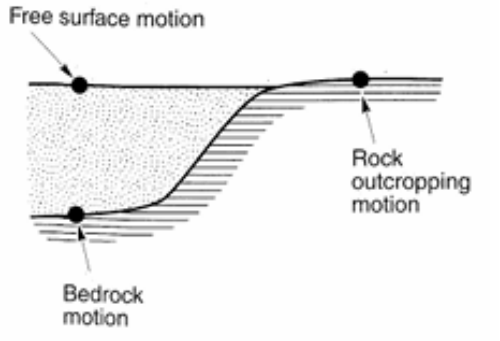


Figura 2.5: Modelo geológico ideal para la aplicación de la técnica de cocientes espectrales, en el que se encuentra un lecho rocoso que sirve como base de una capa sedimentaria superficial. La impedancia entre las capas resultará en la amplificación de las ondas sísmicas, provocando un efecto de sitio: Kramer (1996)

Con todo lo mencionado, el procedimiento matemático que sustenta esta técnica comienza exponiendo las expresiones que relacionan los espectros de Fourier para diferentes componentes de movimiento. En este contexto, Hb y Hs se refieren a los movimientos horizontales, mientras que Vb y Vs corresponden a los movimientos verticales del espectro de amplitud, siendo Hb y Vb las componentes en el lecho rocoso, y Hs y Vs las componentes en la superficie.

$$As(w) = \frac{Vs(w)}{Vb(w)}, \tag{2.2}$$

donde *As(w)* representa el efecto de amplitud de las ondas Rayleigh, recordando que estas son producidas por ondas de tipo SV y compresionales. Es lógico pensar que en efecto de las ondas Rayleigh es nulo cuando As(w) es uno, es decir, cuando Vs y Vb son muy similares en su espectro de amplitud.

Continuando, una forma de evaluar el efecto de sitio (*Se(w)*) segun Nakamura, es mediante la siguiente expresión

$$Se(w) = \frac{Hs(w)}{Hb(w)}. \tag{2.3}$$

Sin embargo, como *Hs(w)* representa ondas de la capa superficial, por ende, es necesario remover este tipo de ondas de la expresión *Se(w)*.

$$S_M(w) = \frac{Se(w)}{As(w)} = \frac{Hs(w)}{Hb(w)} \times \frac{Vb(w)}{Vs(w)}. \tag{2.4}$$

Considerando que el lecho rocoso (capa subyacente a los sedimentos) está conformado por materiales geológicos muy similares y rígidos, Nakamura plantea que el desplazamiento de las ondas es similar en todas direcciones. Por lo tanto, Vb y Hb son aproximadamente equivalentes, $Hb = Vb$.

$$S_M(w) = \frac{Hs(w)}{Vs(w)}. \tag{2.5}$$

Cabe destacar que lo que sustenta este método matemático es que, para poder aplicar la técnica, se requiere una capa de sedimentos sobre un lecho rocoso, donde la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) será distinta en cada capa. Lo anterior implica que, debido a la impedancias entre las capas, ocurra una amplificación de las ondas al pasar del lecho rocoso a la capa sedimentaria.

Finalmente, como es sabido, la técnica de cocientes espectrales tiene como objetivo principal conocer el periodo fundamental del suelo para el monitoreo de inmuebles y su prevención ante un posible daño. Por ello, los parámetros principales que influyen directamente en este objetivo son la profundidad de la capa sedimentaria y la velocidad de la onda de corte V_s. Una vez que se conoce el periodo fundamental del suelo, o su inverso, que corresponde a la frecuencia fundamental, es posible determinar los parámetros mencionados.

$$T = \frac{4H}{VS}, \tag{2.6}$$

donde VS se refiere a la velocidad de corte, el espesor, H, del estrato sedimentario y T al periodo fundamental.

2.4.2. Interferometría sísmica

La interferometría sísmica es una técnica de exploración geofísica relativamente nueva que ha cobrado relevancia, ya que utiliza el ruido sísmico para conocer las propiedades mecánicas del subsuelo y también ayuda a obtener tomografías del mismo. Esta técnica consiste en realizar un registro simultáneo de ruido sísmico en tiempo entre un par de estaciones para luego aplicar la correlación cruzada entre ellas. Una vez obtenida la correlación, se procede a su

apilamiento con el fin de mejorar la calidad de la relación señal-ruido [Gouédard et al., 2008]. Una de las ventajas relevantes de esta técnica es su fácil adquisición, ya que no se necesita una fuente que excite las ondas en el espacio o en alguna de las estaciones para extraer la información.

Supongamos que tenemos un par de estaciones, A y B, ubicadas en puntos diferentes del terreno. El principio de la interferometría sísmica se basa en la hipótesis de que las ondas sísmicas viajan a través del subsuelo pasando por ambas estaciones, desde la estación A hasta la B o viceversa. El viaje de la onda sísmica de una estación a otra se verá reflejado en los registros de ruido sísmico con un retraso de tiempo, el cual se debe a las propiedades mecánicas del medio que la onda sísmica debió atravesar al desplazarse a lo largo del espacio entre ambas estaciones.

Una vez realizado el registro de ruido sísmico, se aplica la correlación cruzada entre las dos estaciones. Esta operación matemática permite medir la similitud entre los registros de ambas estaciones en función del tiempo, y da como resultado una reconstrucción de la respuesta sísmica del medio entre los dos puntos. Dicha respuesta es conocida como función de Green. De hecho, se ha demostrado que la correlación cruzada entre los registros de ruido sísmico adquiridos en dos estaciones distintas, considerando un campo de ondas difuso en un medio heterogéneo, lleva a la construcción de la función de Green [Claerbout, 1968].

Como ya se mencionó, la función de Green describe la respuesta del medio ante una fuerza súbita que actúa dentro de este, como un sismo. Es decir, si se aplica un impulso en algún punto específico del medio, la función de Green describirá cómo esa perturbación se dispersa hacia otros puntos.

Para expresarlo matematicamente, se debe considerar una fuente impulsiva en la estación B que es excitada en el tiempo inicial t_s y donde la estación A ubicada en otra parte del espacio describe la función de Green $g(A, t|B, t_s)$. Dado que el método de interferometría sísmica permite describir el medio como si una fuente virtual estuviera ubicada en el receptor, las N fuentes situadas en la profundidad z_A pueden representarse mediante la función de autocorrelación $\Phi(B|A)$. La superposición (suma) de estas fuentes virtuales en z_A permite reescalar

o redimensionar los datos, dependiendo del caso de estudio [Thomas Schuster, 2009].

$$\Phi(B|A) = \sum_{z_A} D(B|A)D(B|A)^*, \tag{2.7}$$

donde A representa la coordenada (x_A, y_A, z_A) correspondiente a la ubicación de la fuente y B la coordenada $(x_A, y_A, 0)$ correspondiente a la posición del receptor. Si se aplica la transformada inversa de Fourier a la función de correlación (Ecuación 2.7), se obtiene la parte anticausal y causal de la correlación.

$$\Phi(B, t|A) = N[2\pi\delta(t + \tau_{yzy}) + 4\pi\delta(t) + 2\pi\delta(t - \tau_{yzy})], \tag{2.8}$$

donde $2\pi\delta(t + \tau_{yzy})$ representa la parte anticausal y $4\pi\delta(t) + 2\pi\delta(t - \tau_{yzy})$ la parte causal de la función de Green.

Cuando se aplica la operación matemática de la correlación cruzada entre las dos estaciones de registro, da como resultado una nueva señal que se divide en dos partes: la anticausal y la causal (Figura 2.6). La parte causal de la señal obtenida representa la porción de la señal que aparece después del tiempo cero en la correlación, expresando el tiempo en el que la onda viaja desde la primera estación a la segunda. Por otro lado, la parte anticausal es la porción de la correlación que aparece antes del tiempo cero y expresa el tiempo en el que viaja la onda, pero en dirección contraria, es decir, de la segunda estación a la primera.

En la ecuación 2.8 se representa la función de Green, tanto la parte causal como la anticausal, pero también se debe destacar que estas dos partes están influenciadas directamente por el número de fuentes de ruido *N*. Por ende, la amplitud de la parte causal y anticausal dependerá de esto. Considerando que en la práctica los medios suelen ser no homogéneos, la distribución de las fuentes de ruido no será igual por debajo de la estación 1 que de la estación 2 (Figura 2.6-b).

Por lo tanto, la distribución de las fuentes y la elección de la estación base considerada como fuente impulsiva determinarán si el impulso de la máxima correlación en la función de Green se encuentra en la parte causal o anticausal. Si se tratara de un medio ideal y homogéneo, la distribución de las fuentes sería la misma en todo el espacio y la función de Green sería

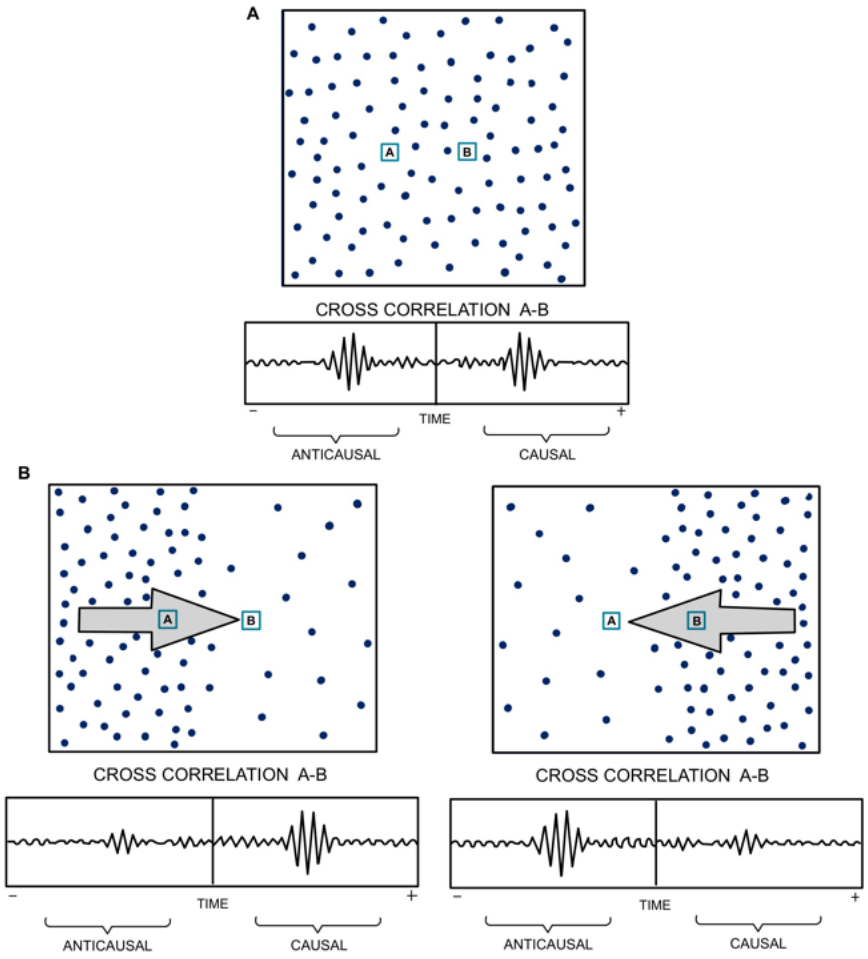


Figura 2.6: Representación de la simetría y asimetría de la función de Green en función de las fuentes de ruido. (a) Las fuentes están distribuidas de forma homogénea en el espacio. (b) Distribución no homogénea en el espacio, provocando una asimetría en la función de Green dependiente de la dirección en la que viajan las ondas por la cantidad de fuentes de ruido. Modificada de Stehly (2006)

simétrica (Figura 2.6-a).

2.4.3. Instrumentación sísmica para monitoreo sísmico

La instrumentación sísmica de estructuras implica la instalación, de manera permanente o temporal, de sensores sísmicos en puntos estratégicos de la estructura. Su objetivo es identificar las características de la estructura a lo largo del tiempo, con el fin de detectar posibles cambios que puedan comprometer su rigidez estructural, a través del monitoreo sísmico. Esta metodología ha sido adoptada para estudiar diversas infraestructuras, como puentes, edificaciones, presas e incluso volcanes, con el propósito de monitorear su comportamiento y prevenir riesgos.

El objetivo de la instrumentación sísmica para sistemas estructurales en geofísica es obtener una comprensión sólida de la estructura, lo que permite evaluar el potencial de daño de las edificaciones frente a la carga dinámica impuesta por los distintos tipos de terremotos que pueden ocurrir en determinadas regiones, según la dinámica tectónica de cada zona [Mehmet Çelebi, 2000].

Dentro del monitoreo básico de una estructura se encuentra la identificación de su frecuencia natural, ya que esto permite evaluar cómo se comportará ante los diferentes tipos de terremotos que puedan ocurrir. La frecuencia natural de una estructura es su capacidad para vibrar en respuesta a excitaciones externas, como el ruido sísmico. Conocer el valor de esta frecuencia es fundamental, ya que la resonancia, que se produce cuando las frecuencias de un sismo coinciden con la frecuencia natural de la estructura, puede ocasionar una amplificación de las vibraciones, lo que incrementa significativamente el riesgo de daños graves o incluso el colapso de la estructura.

El monitoreo sísmico de estructuras de gran valor cultural, es decir, aquellas que forman parte del patrimonio cultural, es fundamental para su conservación y preservación. Este monitoreo cobra especial importancia debido a que la mayoría de estas estructuras fueron construidas hace más de 100 años y, a lo largo del tiempo, han estado expuestas a energías repentinas, como las generadas por terremotos en zonas con alta actividad sísmica, como la Ciudad de México.

Estos estudios son de gran valor tanto para el patrimonio cultural como para cualquier tipo de estructura relacionada con la actividad humana, ya que permiten prevenir daños futuros al reducir los factores que podrían afectar su integridad. En los últimos años, se ha demostrado que incluso las condiciones climáticas pueden influir directamente en la frecuencia natural de las estructuras, lo que aumenta el riesgo de que sean dañados por estos factores.

2.5. Inversión de datos geofísicos

La teoría de inversión de datos geofísicos es un proceso donde se aplican métodos matemáticos a una serie de datos que fueron adquiridos en campo por métodos geofísicos indirectos con el fin de obtener un modelo coherente del fenómeno de interés en el subsuelo, es decir, la inversión de datos geofísicos se basa en la inferencia de parámetros y propiedades del medio a partir de los datos observados en campo [Ramirez Camargo and Bosch, 2013].

En geofísica, el problema directo implica calcular las mediciones esperadas en superficie a partir de un modelo conocido del subsuelo y principios físicos establecidos. Por ejemplo, conociendo la distribución de velocidades sísmicas en un medio, podemos predecir con precisión los tiempos de llegada de las ondas a cada sensor.

Por el contrario, el problema inverso aborda la situación opuesta; donde se intenta reconstruir las características del subsuelo a partir de los datos registrados en campo. En este caso, utilizando los tiempos de llegada de las ondas medidos experimentalmente, buscamos inferir la distribución de velocidades en el medio investigado.

La diferencia radica en su complejidad matemática. Mientras el problema directo ofrece una solución única determinada por ecuaciones físicas bien definidas, el problema inverso presenta dificultades adicionales. Requiere técnicas de métodos numéricos avanzados para obtener soluciones estables y geológicamente lógicas.

Esto es muy relevante para la geofísica, ya que la mayoría de los métodos geofísicos miden

directamente el fenómeno de interés en la zona de estudio, es decir, registran la respuesta del medio ante dicho fenómeno. Para interpretar estos datos, es necesario realizar una inversión geofísica con el fin de determinar las propiedades del subsuelo que generan esa respuesta particular.

Sin embargo, cuando se emplea un único método geofísico para caracterizar la estructura del subsuelo, se enfrenta un problema de no unicidad, lo que significa que pueden existir múltiples modelos del subsuelo que expliquen los mismos datos observados. Para resolver esta ambigüedad, es fundamental realizar la inversión de datos geofísicos empleando al menos dos técnicas distintas. En este trabajo, se han utilizado datos sísmicos y se han aplicado las técnicas de interferometría sísmica y cocientes espectrales para caracterizar la estructura del subsuelo.

Existen diferentes tipos de algoritmos de inversión utilizados para conocer las propiedades físicas en el sitio de interés, el más simple son los algoritmos lineales en donde la relación de los datos observados y el modelo del subsuelo se expresa como una ecuación lineal (Ec. 2.9). Dicha ecuación lineal se resuelve intentando minimizar la diferencia entre los datos observados y los predichos por el modelo (Ec 2.10).

$$d = Gm, \tag{2.9}$$

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d, \tag{2.10}$$

donde d es el vector de datos observados, m son los parámetros del modelo deseable y G es el kernel de inversión [Vargas Zamudio, 2019], que se refiere a la matriz que relaciona los datos con los parámetros del modelo. Por otro lado, cuando la relación entre los datos observados y los parámetros del modelo no es lineal, será necesario resolver el problema con algoritmos de inversión no lineales. Por lo tanto, ahora tenemos una ecuación no lineal que invierte los datos geofísicos mediante técnicas iterativas.

$$d = F(m), \tag{2.11}$$

donde F(m) es una función no lineal que relaciona los parámetros del modelo con los datos

observados. En el caso del presente trabajo se realizó una inversión de datos utilizando métodos no lineales y con ayuda del algoritmo Monte Carlo.

El método de Monte Carlo tiene un enfoque básicamente probabilístico, que utiliza la generación de soluciones aleatorias para explorar los parámetros del medio y encontrar el modelo que se ajuste de mejor forma a los datos. De manera más específica, el método de Monte Carlo genera una muestra totalmente aleatoria mediante la cual imita la realidad. Lo mencionado anteriormente, implica que se genera una gama de muestras aleatorias dentro de las cuales se espera que se encuentre la solución ideal [Zorilla C., 2019].

El proceso de búsqueda de solución de Monte Carlo, vuelve a este método uno de los más utilizados, ya que, explora diversas soluciones evitando quedar atrapado en mínimos locales, volviéndolo ideal para la inversión de datos que fueron adquiridos en medios heterogéneos. Sin embargo, una de las desventajas de este método es su alto costo computacional, debido a que comúnmente se requieren de muchas simulaciones para obtener buenos resultados.

Capítulo 3

Sitio de estudio y diseño de experimentos

El Museo del Carmen se encuentra en la delegación de Alvaro Obregón (Figura 3.1b), ubicada en la parte occidental de la Ciudad de México (Figura 3.1a), el área se encuentra en la latitud $19^{o}48'$ norte y la longitud $101^{o}02'$ oeste. Esta alcaldía, reconocida por su valor cultural e histórico, limita al norte con la alcaldía Miguel Hidalgo, al este con Coyoacan y Benito Juarez, al oeste con Cuajimalpa y al sur con Tlalpan. Dentro de esta alcaldía se encuentran importantes formaciones geológicas, como la Formación Tarango, las lavas del Xitle, rellenos aluviales, y otros depósitos sedimentarios que juegan un papel clave en la composición geológica del subsuelo.

De forma más específica, el Museo del Carmen se localiza en el límite oriental de la alcaldía Álvaro Obregón, junto al Parque "La Bombilla", en la colonia San Ángel. Asimismo, el museo está delimitado por dos avenidas principales: al este por la Avenida Insurgentes Sur y al oeste por la Avenida Revolución, ambas de gran relevancia en la movilidad y la configuración urbana de la zona.

Ahora bien, al centrarse en el área de estudio correspondiente a este trabajo (Figura 3.2), se observa que el Museo del Carmen presenta diversas estructuras y condiciones particulares. En la parte sur del recinto se encuentra un acueducto, el cual, según información proporcionada por el personal administrativo del museo, fue construido con la finalidad de desviar un río que anteriormente atravesaba la zona, con el objetivo de abastecer de agua a distintos puntos de la ciudad.

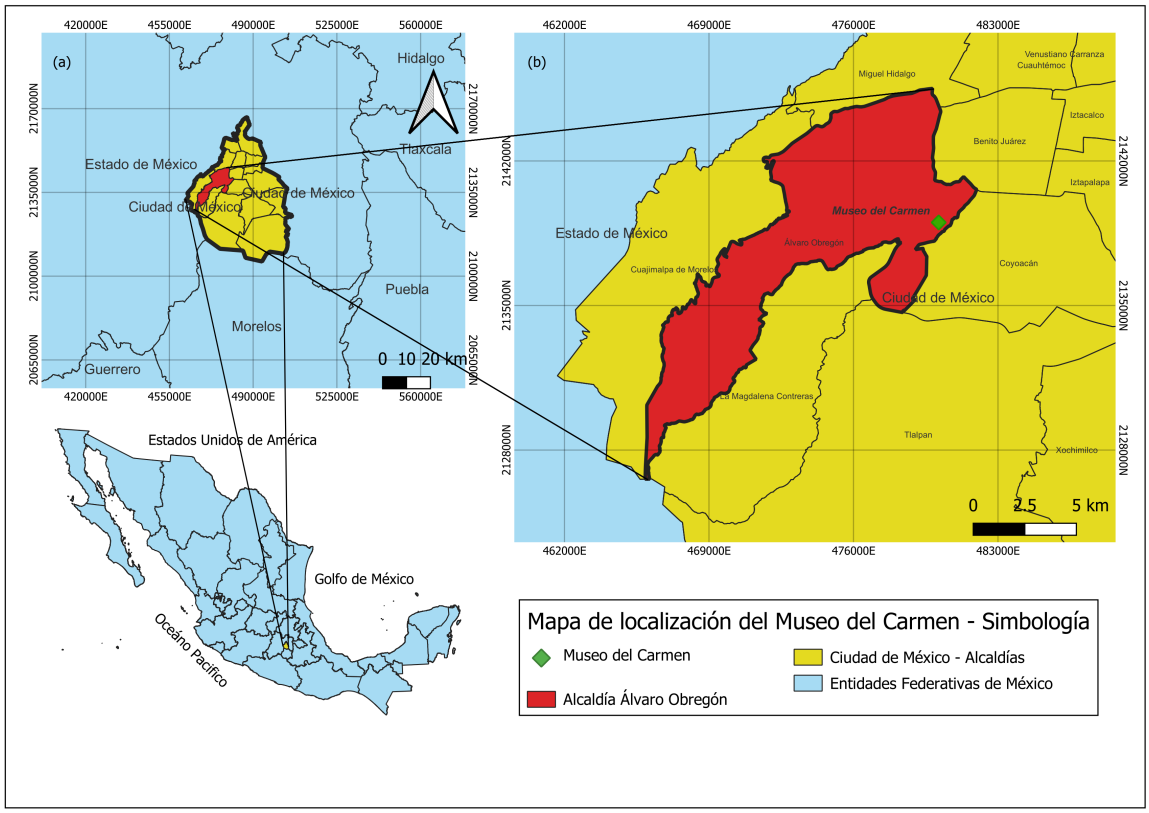


Figura 3.1: Mapa de localización del Museo del Carmen, entidad federativa y alcaldía.

En la sección sureste se localiza un edificio administrativo, en el cual se han reportado movimientos bruscos en comparación con otras zonas del museo durante eventos sísmicos. Cabe destacar que el recinto cuenta con un muro de aproximadamente 15 metros de altura, el cual ha presentado fracturas durante eventos sísmicos pasados, estos daños han sido resanados.

Asimismo, se han identificado problemas de humedad en la mayoría de las instalaciones del Museo del Carmen. Por otro lado, en la parte noroeste, opuesta al edificio administrativo, se encuentra la Iglesia del Carmen, cuya cúpula principal presenta daños visibles, al igual que algunos muros colindantes con el museo, los cuales muestran grietas y humedad.

Durante este estudio se llevaron a cabo tres campañas de medición, todas enfocadas en la recolección de ruido sísmico ambiental, pero con distintas duraciones y objetivos.

- **Primera campaña (diciembre de 2023):** Fue liderada por la Ing. Thalía Alfonsina Reyes Pimentel y consistió en mediciones de ruido sísmico con una duración de 30 a 40 minutos por punto.

- **Segunda campaña (junio de 2024):** Estuvo a cargo del Dr. Martín Cárdenas Soto, en colaboración con el M.C. David Escobedo Zenil y el M.I. José Antonio Martínez González. En esta etapa se realizaron mediciones sincronizadas temporalmente de hasta 3 horas, en distintos puntos del museo, con el objetivo de aplicar la técnica de interferometría sísmica.

- **Tercera campaña (julio de 2024):** Campaña liderada por el Dr. Martín Cárdenas Soto, donde se instalaron estaciones sincronizadas temporalmente para llevar a cabo un monitoreo sísmico continuo en dos estructuras del Museo del Carmen. En este caso, los instrumentos permanecieron registrando datos durante un periodo de una a dos semanas.

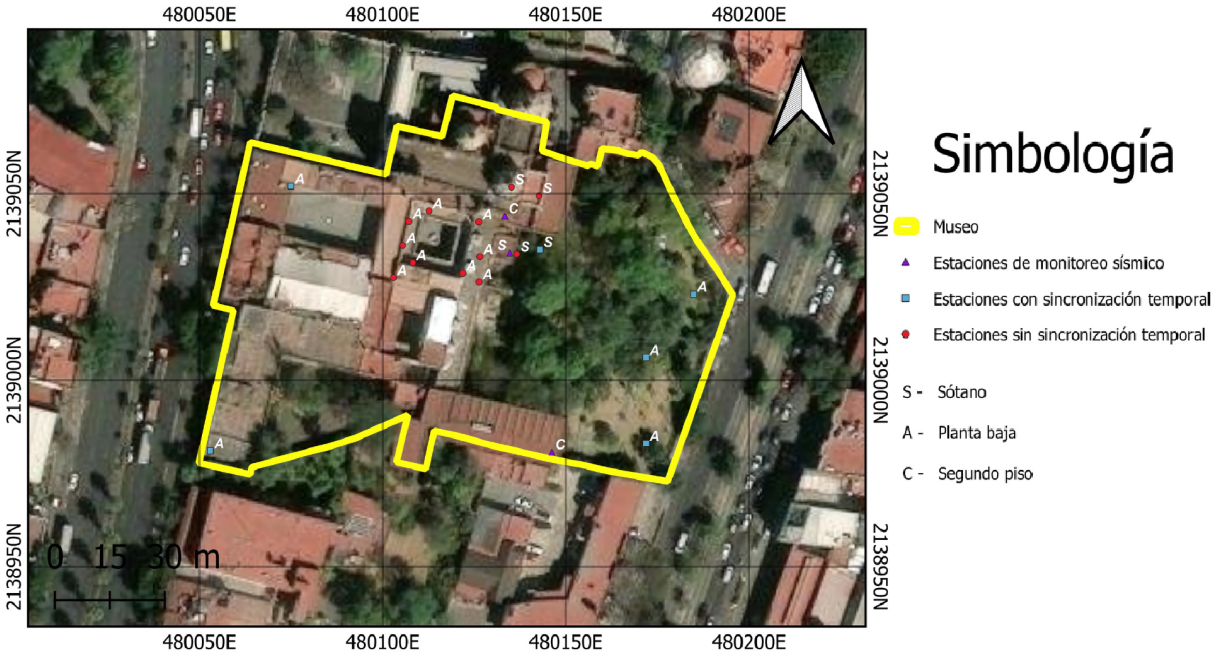


Figura 3.2: Mapa representativo de la adquisición de registros de ruido sismico. Las letras asignadas en cada estación indican la posición en altura que tienen; sótano (S), planta baja (A) y segundo piso (C). La clasificación de planta baja contempla tanto las estaciones ubicadas en en los jardines y planta baja de construcciones.

Las mediciones realizadas durante las tres campañas descritas anteriormente se efectuaron utilizando sismómetros digitales Güralp 6T de banda ancha (Figura 3.3). Este instrumento, de configuración triaxial y alta sensibilidad, es capaz de registrar movimientos sísmicos en un amplio rango de frecuencias, desde períodos largos asociados a eventos telúricos distantes hasta frecuencias más altas correspondientes a ruido ambiental local. Gracias a su diseño

compacto y robusto, es adecuado tanto para despliegues rápidos como para registros prolongados en campo. Su respuesta de banda ancha y su bajo nivel de ruido instrumental lo hacen especialmente útil para la detección de telesismos y para estudios de interferometría sísmica, como los desarrollados en este estudio.



Figura 3.3: Sismometro Guralp 6T utilizado para las mediciones de ruido sísmico ambiental en distintos puntos del Museo del Carmen.

Se llevaron a cabo un total de 20 mediciones distribuidas a lo largo del terreno del Museo del Carmen (Figura 3.2). De estas, nueve se realizaron con sincronización temporal entre los instrumentos, condición necesaria para la aplicación de técnicas de interferometría sísmica y monitoreo sísmico. En particular, seis mediciones fueron destinadas a interferometría sísmica y tres a monitoreo sísmico entre tres estructuras principales: el osario (ubicado en el sótano), el edificio administrativo y un costado de la cúpula de la Iglesia del Carmen. Las doce mediciones restantes se enfocaron en la obtención de los cocientes espectrales. Es importante mencionar que las mediciones con sincronización temporal también resultaron útiles para el cálculo de la razón espectral, lo que permitió ampliar la cobertura del análisis realizado en la zona de estudio.

3.1. Contexto geoténico y sísmico del entorno del Museo del Carmen

Marsal y Mazari realizaron uno de los primeros estudios sistemáticos sobre la zonificación geotécnica del subsuelo en la Ciudad de México, estableciendo una base fundamental para trabajos posteriores en la región. El resultado de su trabajo a lo largo de lo años fue la división de la ciudad en tres zonas principales: Lomas (zona I), Transición (zona II) y Lago (zona III), clasificación que fue integrada en el Reglamento de Construcciones del Gobierno del Distrito Federal (GDF) [Lermo Samaniego et al., 2020]. Estas zonas se describen a continuación:

1. **Zona I, Lomas**: Referida para áreas donde predominan los suelos duros, formados por materiales volcánicos que en ocasiones se encuentran intercalados con capas arenosas.

2. **Zona II, Transición**: Abarca zonas de materiales mixtos, arenosos y limo-arenosos con presencia de intercalaciones de arcillas lacustres. Los depósitos profundos en esta zona están a 20 metros de profundidad o menos.

3. **Zona III, Lago**: Compuesta principalmente de depósitos de arcilla de alta compresión, es una zona de alto riesgo, ya que puede presentar alta deformabilidad y una elevada posibilidad de hundimientos.

Juárez Camarena et al. (2016) realizaron una zonificación geotécnica tomando como base las tres divisiones que estableció Marsal y Mazari. Con lo anterior, presentaron en su trabajo un mapa de la Ciudad de México mostrando la distribución de la zona de lomas, transición y lago. Esta zonificación tiene como diferencia el uso de herramientas matemáticas, cálculo geoestadístico, acudiendo a datos topográficos y geológicos.

Hasta ahora, la zonificación geotécnica de la Ciudad de México parecía estar bien definida con las tres zonas mencionadas anteriormente. No obstante, en algunas áreas clasificadas como zonas de loma especialmente aquellas que son planas y bastante extensas se creía que pueden presentarse picos en las amplitudes relativas y en los periodos del suelo, los cuales se asemejan más a los de las otras dos zonas.

El Instituto de Ingeniería realizó una actualización de la zonificación de periodos dominantes de la Ciudad de México, considerando mediciones adicionales a las ya registradas en las

zonificaciones anteriores, con el objetivo de mejorar la calidad de dicha zonificación y cubrir áreas con menor densidad de registros. Este esfuerzo permitió obtener una zonificación más detallada en partes de la alcaldía de Álvaro Obregón, el resultado obtenido a traves de esta actualización ilustra que la alcaldía Álvaro Obregón que se encontraba clasificada como zona totalmente de lomas, ahora presentá distintas zonas a lo largo de su área.

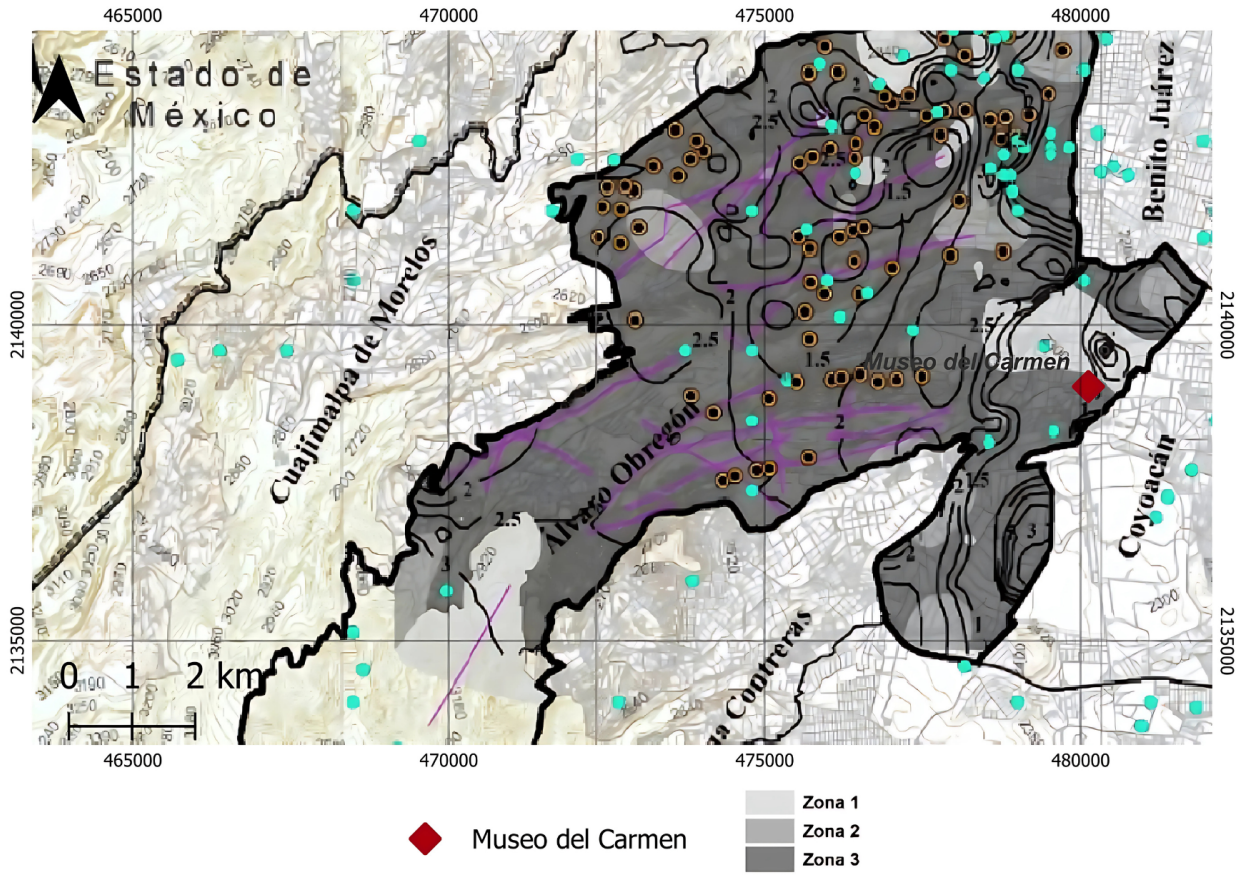


Figura 3.4: Mapa de zonificación geotécnica, mostrando la partición de zonas de lago, transición y lomas en Álvaro Obregón. Modificada de Instituto de Ingeniería (2020).

Según la microzonificación sísmica que realizo el Instituto de Ingeniería en Álvaro Obregón (Figura 3.4), muestra que la zona del Museo del Carmen se encuentra ubicado en un limite entre Zona I y Zona III, cabe señalar que esta microzonificación es basada en la amplificación relativa del terreno, según este mismo estudio la zona del Museo presenta amplitudes de 2 a 3 veces. Finalmente, los mapas de periodos de esta misma alcaldía hechos por el Instituto de Ingeniería muestran que los periodos dominantes de la zona del museo varían de 0.5 s a 1.0 s, lo que corresponde a una frecuencia dominante entre 1 Hz y 2 Hz.

3.2. Situación del peligro sísmico en el sitio de estudio

De acuerdo con el Atlas de Riesgo de la Alcaldía Álvaro Obregón el cálculo de la vulnerabilidad social se realizó a partir del censo poblacional y de vivienda del año 2010 de INEGI con el fin de calcular 18 índices sociales que forman la base para determinar la vulnerabilidad social en la alcaldía [Zamorano Orozco et al., 2025].

Los resultados arrojaron un indicador de vulnerabilidad social dividido en cinco categorías (muy baja, baja, media, alta, muy alta), que reflejan el nivel de riesgo por manzana, vivienda o población total. En términos generales, la alcaldía Álvaro Obregón mostró que el 34.5 % de la población presenta muy baja vulnerabilidad, el 42.9 % baja vulnerabilidad, el 18.7 % vulnerabilidad media, el 3.4 % alta vulnerabilidad y el 0.4 % se encuentra en el rango de muy alta vulnerabilidad.

La manzana en la que se encuentra el Museo del Carmen está clasificada como una zona de vulnerabilidad social baja y de forma similar las áreas circundantes a esa manzana varían en las categorías de vulnerabilidad social muy baja y baja.

El atlas de riesgo arrojó un indicador por riesgo sísmico con tres categorías para el riesgo: alto, medio y bajo. Los parámetros utilizados para obtener los resultados de riesgo por sismos abarcan el riesgo por localización y variables adicionales como número de viviendas, manzanas y población total (también tomadas para el cálculo de la vulnerabilidad). La alcaldía Álvaro Obregón arrojó los siguientes resultados: el 3.9 % de la población se encuentra en riesgo alto, el 62.9 % en riesgo medio y el 33.2 % en riesgo bajo.

La zona en la que se ubica el Museo del Carmen está clasificada como de riesgo medio ante la posibilidad de un evento sísmico. Sin embargo, el documeto consultado, hace énfasis en la necesidad de considerar la población como una variable en el cálculo del riesgo, siendo fundamental reconocer que esta puede variar debido a la dinámica social de desplazamiento hacia áreas comerciales y laborales. En este contexto, el Museo del Carmen, como centro turístico y cultural, atrae no solo a la población local, sino también a visitantes nacionales e internacionales, lo que incrementa la exposición al riesgo ante un sismo.

Dado este flujo de visitantes, es crucial implementar y difundir protocolos de respuesta ante emergencias para salvaguardar tanto a los habitantes de la zona como a los turistas. La existencia de planes de evacuación, señalización clara, capacitación al personal y simulacros periódicos son medidas esenciales para reducir el riesgo de lesiones y pérdidas humanas. Estos protocolos deben ser adaptados y actualizados regularmente para enfrentar adecuadamente las características de un sitio con alta afluencia de personas en constante cambio.

Capítulo 4

Procesamiento de los datos

El procesamiento de datos con ruido sísmico requiere de la manipulación de los registros de ruido sísmico ambiental adquiridos en campo, con el fin de obtener una señal con información necesaria y suficiente para aplicar metodologías que arrojen resultados interpretables.

Los parámetros de procesamiento de ruido sísmico dependen del objetivo del estudio, diseño de la adquisición, tamaño del proyecto (local y regional) y condiciones generales durante la adquisición. Es importante recordar que el procesamiento de ruido sísmico es rico en frecuencias, es decir, el ruido ambiental está compuesto por una variedad grande de frecuencias, sin embargo, existen algunos indicadores ya establecidos en la teoría sobre las fuentes generadoras de ruido sísmico tomando como referencia el contenido de frecuencia que genera cada fuente y esto es información util para la toma de desiciones durante el procesamiento de los datos.

Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que las distintas técnicas geofísicas que utilizan el ruido sísmico tienen características distintas y operan matemáticamente distinto. Con lo mencionado anteriormente, se debe considerar que el procesamiento de datos es variable y considera el principio físico y teórico de la técnica a utilizar.

En el presente trabajo se realizaron distintas técnicas que utilizan el ruido sísmico para entender y caracterizar el subsuelo del Museo del Carmen, es por ello, que se desglosara el procesamiento utilizado en cada método durante este capítulo.

4.1. Procesamiento para Interferometría Sísmica

Para el procesamiento de los datos en la técnica de interferometría sísmica se utilizó el software libre y distribuido por IRIS DMC, SAC (Seismic Analysis Code); su propósito general es el análisis y procesamiento de formas de onda. Partimos del preprocesado (figura 4.1) de los datos que es necesario para que los registros de ruido sísmico coincidan en el dominio del tiempo desde su inicio, hasta su fin. Lo anterior es necesario para aplicar la correlación cruzada en la etapa de procesamiento.



Figura 4.1: Diagrama de flujo que muestra el preprocesamiento de los registros crudos adquiridos en campo.

La etapa de procesamiento, se llevo a cabo con la ayuda de diferentes tecnicas, hasta llegar a la obtención de la función de Green, dichas técnicas se refieren a procesos matematicos que afectan directamente a la señal en el dominio del tiempo y de las frecuencias. En relación con el preprocesamiento, esta etapa se llevo a cabo con el software SAC.

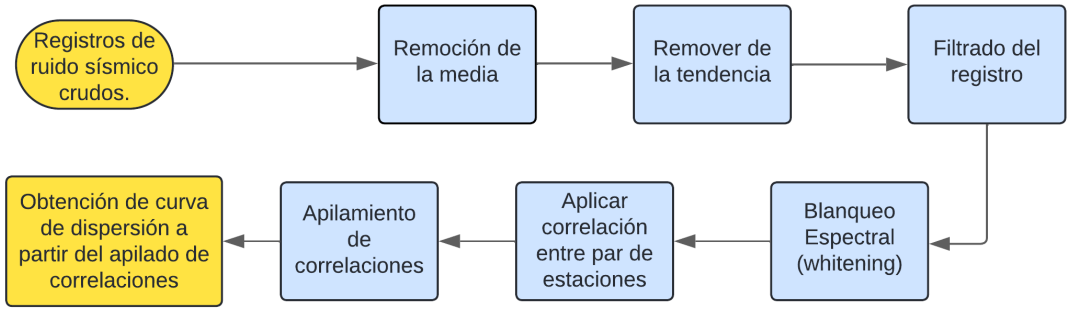


Figura 4.2: Diagrama de flujo sobre el procesado aplicado entre pares registros de ruido sísmico

Como se observa en la Figura 4.2, el procesamiento es una metodología clave que mejora la calidad de los registros, preparando los datos de manera adecuada para el cálculo de la correlación. Esto permite obtener resultados más precisos y confiables.

4.1.1. Remoción de la media y tendencia

La remoción de la media y la tendencia son los primeros pasos del procesamiento de los registros. En ocasiones, los registros de ruido sísmico tienen un valor promedio que es distinto

a cero, como se muestra en la Figura 4.3, esto se debe posiblemente al ruido de fondo o al ruido instrumental y no es lo ideal. Al aplicar la remoción de la media en los registros, estos se centran en cero, eliminando este valor medio de la señal.

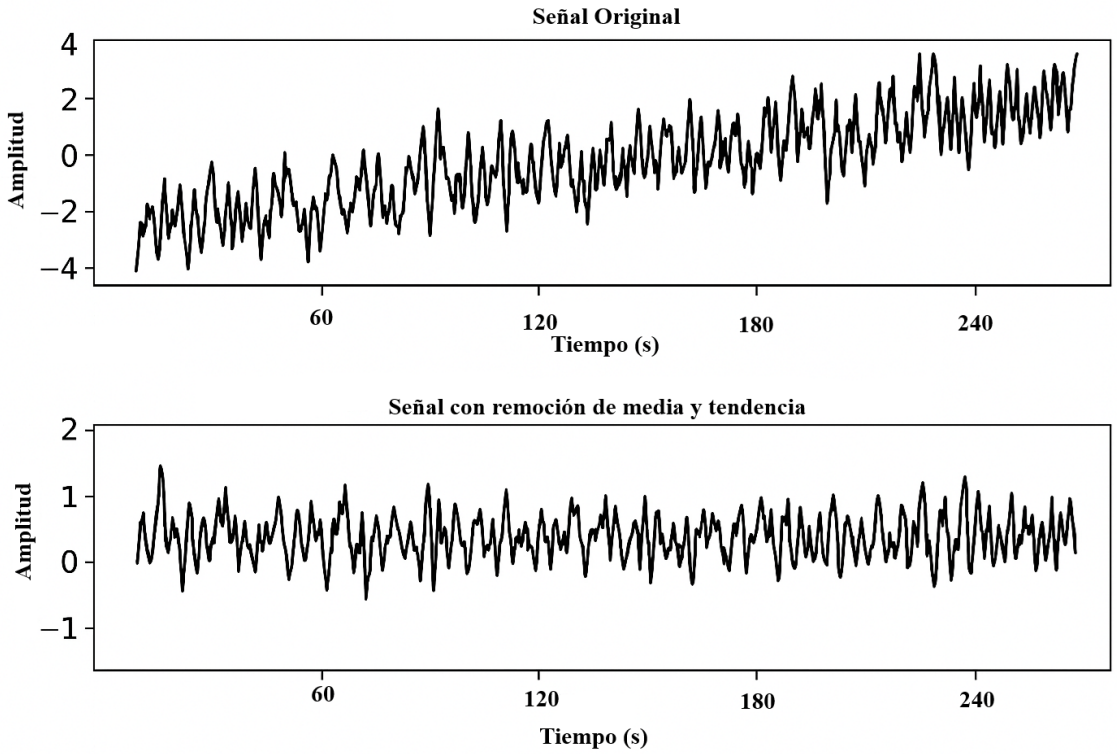


Figura 4.3: Remoción de la media y tendencia a una señal de ruido sísmico.

El problema de la tendencia en el registro de la señal ocurre cuando, durante el periodo de medición, se producen cambios lentos en los datos debido al desgaste del instrumental y a las condiciones climáticas del sitio. Este fenómeno es comúnmente observado cuando la señal sigue una línea inclinada o curva. Para corregir este efecto, el software SAC (Seismic Analysis Code) aplica un proceso de remoción de tendencia y media. Este ajuste se realiza utilizando una función lineal calculada mediante mínimos cuadrados, que luego se resta de la señal original, mejorando así la calidad del registro.

4.1.2. Filtrado del registro

El objetivo de procesar una señal con un filtro es suavizar cierto contenido de frecuencias que no son de nuestro interés y conservar otro rango de frecuencias (Figura 4.4), que comúnmente es el que nos ayuda a encontrar los resultados que queremos. Cada filtro requiere

como variables de entrada las frecuencias de corte para realizar el suavizado.

Según la teoría de filtros, existen dos categorías extensas de filtros; los filtros analógicos y los filtros digitales. Por una parte, los filtros analógicos procesan señales de variables continuas, como lo es el tiempo, y por otra parte, los filtros digitales están enfocados a procesar señales de variables discretas [Farah Binti Hussin et al., 2016].

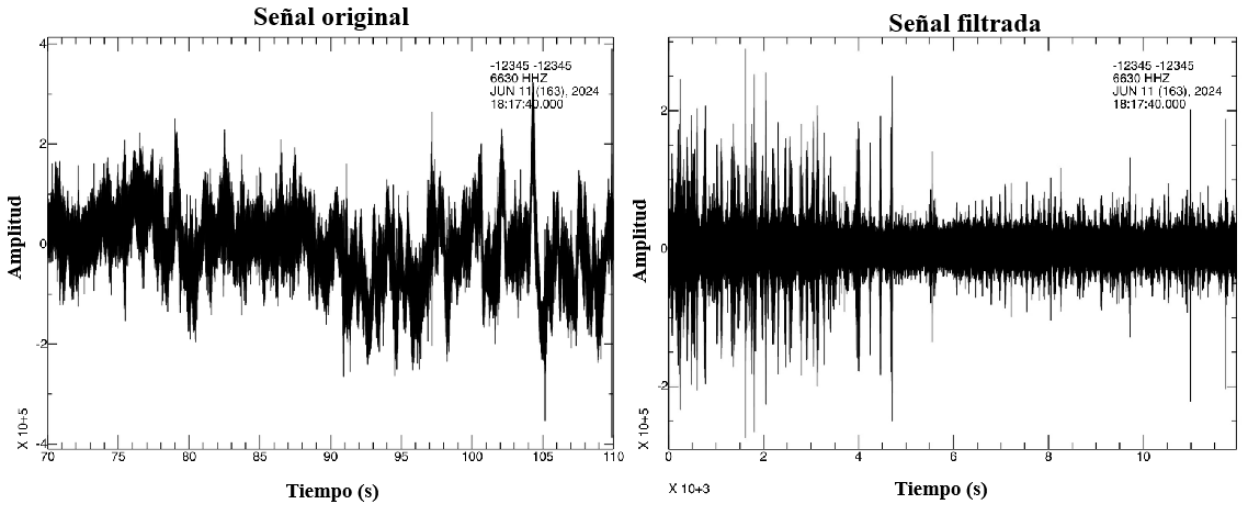


Figura 4.4: Filtro Buttherworth de dos polos aplicado al registro de ruido sísmico.

En el presente trabajo se utilizó un filtro digital pasa bandas de tipo Butterworth, aplicado a los registros digitalizados de ruido sísmico ambiental. Este tipo de filtro se caracteriza por tener una respuesta máximamente plana en la banda pasante, lo que permite conservar las características del contenido espectral sin introducir ondulaciones en esa región, es decir, al aplicar el filtro, no genera ondulaciones en la banda de paso, mientras que en las bandas de rechazo reduce la respuesta de frecuencia a cero. Las variables de entrada de un filtro Butterworth, además de las frecuencias de corte que definen el ancho de banda del filtro, son el orden del filtro y el número de polos, los cuales definen la exigencia del filtro. El orden del filtro se refiere a que tan abrupta es la pendiente de atenuación de la banda, mientras que los polos definen el grado en el que la banda de rechazo es atenuada.

Los parámetros utilizados en este trabajo para el filtro pasa-bandas de tipo Butterworth fueron las frecuencias de corte de 4 Hz y 12 Hz, con una configuración de dos polos y grado dos. La elección de las frecuencias de corte fue siguiendo el principio físico de longitud de onda, llevando esto a considerar la distancia entre el par de estaciones. Al considerar que

las estaciones están a distancias variables entre 40 y 120 metros, se optó por que esta banda de frecuencias era las más adecuada para capturar las longitudes de onda entre el par de estaciones.

4.1.3. Blanqueo espectral (whitening)

Como ya se mencionó con anterioridad, el procesamiento tiene como objetivo tener la mejor calidad en la representación del subsuelo, es por ello, que en los registros de ruido sísmico se requiere de una buena resolución temporal.

El blanqueamiento espectral o también conocido como whitening, ayuda a la mejora de resolución temporal en el registro. El proceso que realiza esta técnica es en el dominio de la frecuencia, es decir, se aplica una transformada de Fourier, luego el espectro de amplitud de la señal es segmentado con respecto a la densidad espectral, de tal forma que se normaliza la amplitud de la señal en cada segmento de frecuencias, provocando un efecto de aplanamiento en la señal, tal como se puede apreciar en la figura 4.5.

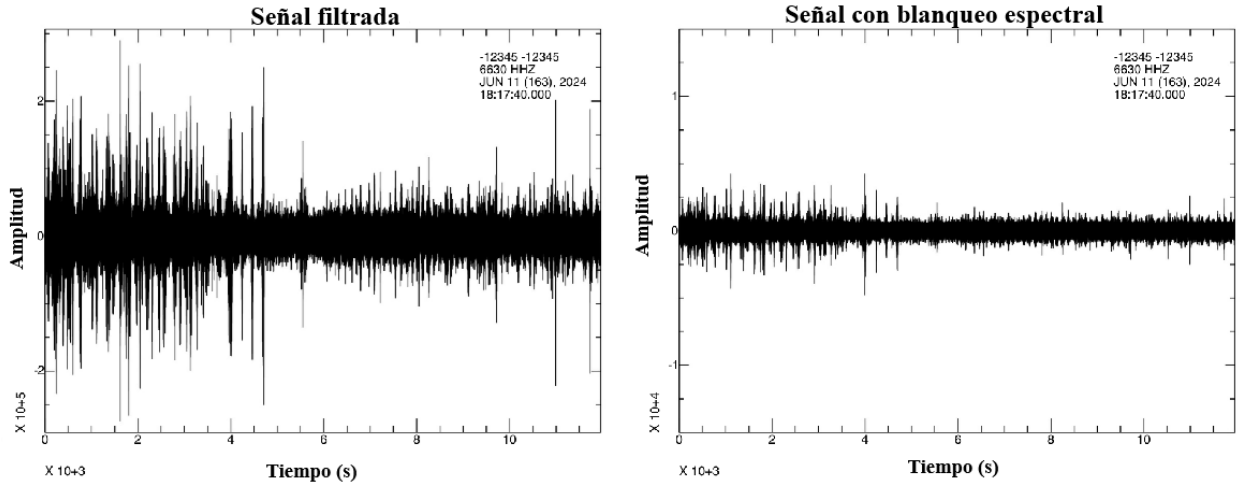


Figura 4.5: Blanqueo espectral aplicado a una señal previamente filtrada con Buttherworth.

Uno de los puntos fuertes del blanqueo espectral es que nos ayuda a resaltar y notar partes de la señal que son de interés, como ondas superficiales, ayudando a resaltar correlaciones temporales. Sin embargo, una de las desventajas de esta técnica, incluyen equilibrar todos los tipos de amplitudes de la señal, especialmente amplitudes altas [Naghadeh and Morley, 2017], provocando un fenómeno de Gibbs en la señal.

4.1.4. Apilamiento

En el campo de la Interferometría Sísmica, el apilamiento es un paso esencial para obtener las funciones de Green empíricas [Xie et al., 2020]. Implica tomar ventanas de tiempo entre los pares de estación, aplicar la correlación cruzada en esa ventana de tiempo y continuar con la siguiente. Al tener la correlación cruzada de todas las ventanas de tiempo de los registros entre pares de estaciones se apilan linealmente, obteniendo una nueva correlación cruzada con mayor detalle e información de los registros de ruido sísmico (Figura 4.6).

El apilamiento es efectivo para aumentar la relación señal-ruido [Zeng and Thurber, 2016], lo cual contribuye notablemente en la calidad de los resultados. En este trabajo se eligieron ventanas de 60 segundos para apilar las correlaciones cruzadas, donde la duración promedio del registro entre todos los posibles pares de estaciones es de dos horas y media a tres horas, por ende, se tenía una buena cantidad de correlaciones para realizar el apilamiento y mejorar la calidad señal-ruido.

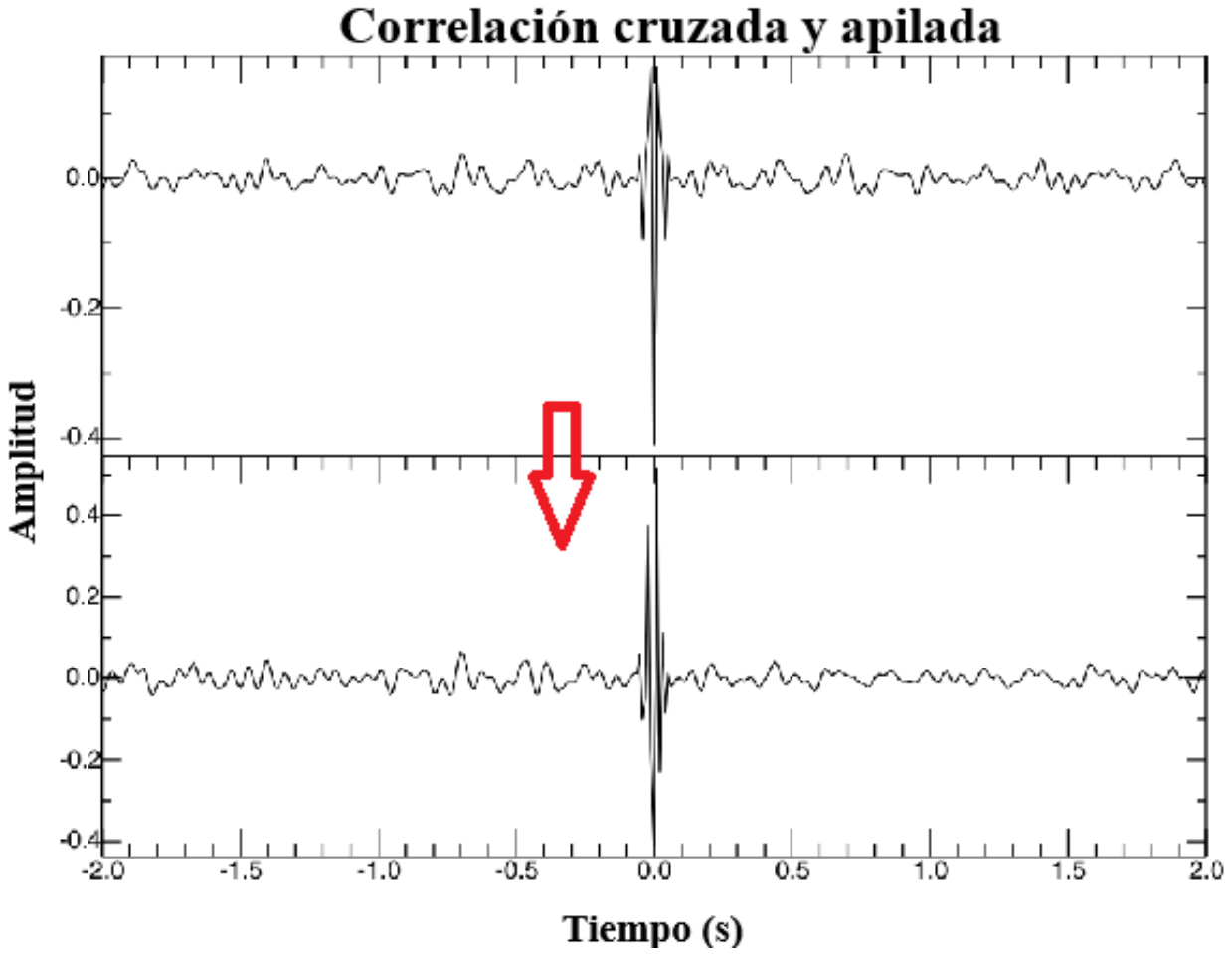


Figura 4.6: Apilamiento (stacking) de una correlación cruzada entre pares de estaciones.

4.2. Procesamiento para cocientes espectrales

El método de cocientes espectrales, en similitud con la interferometría sísmica, requiere de la remoción de la media y la tendencia, debido a que el proceso de adquisición de datos es el mismo y, por ende, la instrumentación sufre los mismos cambios lentos durante el registro de ruido sísmico. Esta parte de remoción de media y tendencia se realizó con SAC, sin embargo, el procesamiento restante para calcular la razón espectral H/V, se llevó a cabo en el software Geopsy [Wathelet et al., 2020].

El software Geopsy es muy interactivo e intuitivo, por lo tanto, el procesado de los datos es sencillo. Existen otras paqueterías en lenguajes de programación de Matlab y Pyhton, pero en este trabajo se consideró y valoro el uso de un software especializado en tratamiento de vibraciones ambientales, además de que cuenta con una guía extensa sobre el procesamiento de los datos para esta técnica.

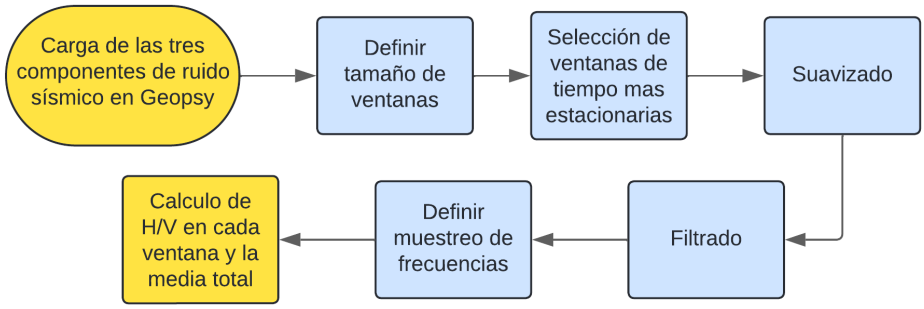


Figura 4.7: Flujo de trabajo utilizado para procesar los registros de ruido sísmico ambiental, para obtener la razón espectral H/V.

En cuanto a la definición del tamaño de ventana, el manual de Geopsy ofrece un cálculo confiable para la longitud de la ventana. Para el cálculo anterior, se deben seguir dos criterios principales (ecuación 4.1 y 4.2) para una curva H/V confiable, el cual está relacionado con la frecuencia fundamental del terreno.

$$f_0 > 10/l_w, \tag{4.1}$$

$$n_c(f_0) > 200, \tag{4.2}$$

donde l_w se refiere a la longitud de la ventana en segundos, f_0 a la frecuencia fundamental del sitio, y $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ representa el número de ciclos significativos en la frecuencia f_0,

siendo un parámetro clave para evaluar la confiabilidad de la curva H/V. De lo anterior, se deduce que para calcular el tamaño de la ventana se debe conocer un aproximado de la frecuencia fundamental esperada del terreno. En el caso de este estudio y debido a los estudios previos realizados por el Instituto de Ingeniería en su proyecto de Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México, se decidió trabajar con un promedio de la frecuencia fundamental en la zona de San Ángel, correspondiente a 1.5 Hz, ya que la zona tiene variaciones de 1 Hz a 2 Hz. Por lo tanto, el tamaño de la ventana calculado y considerando el segundo criterio (ecuación 4.2) para obtener una curva confiable, el tamaño de la ventana fue de 40 segundos (Figura 4.8).

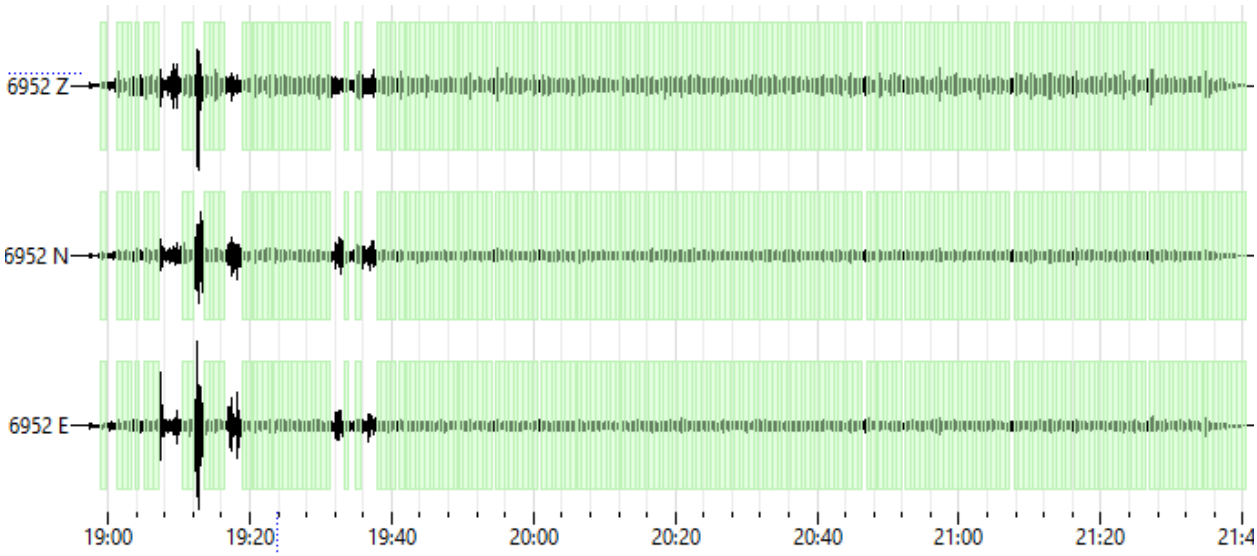


Figura 4.8: Selección de ventanas de longitud de 40 segundos para un registro de dos horas, obteniendo un total de 209 ventanas.

Posteriormente, la selección de ventanas de tiempo más estacionarias para el cálculo de la razón espectral H/V, se realizó con la herramienta integrada por el software, la cual consiste en un el algoritmo STA/LTA el cual nos ayuda a identificar las ventanas de tiempo más estacionarias con el fin de evitar el ruido transitorio (actividad antropogénica del sitio).

El suavizado es un paso importante del procesamiento, ya que, en ocasiones, un mal uso del nivel de suavizado podría afectar los resultados reales del periodo fundamental y amplificación, reduciéndolos. Sin embargo, como se ve en la figura 4.9, el suavizado nos ayuda a controlar y moderar las fluctuaciones que podría tener la curva espectral. En este trabajo se utilizó un suavizado logarítmico, donde el grado de suavizado varia conforme a la frecuencia [Konno and Ohmachi, 1998], el porcentaje de suavizado que se eligió para realizar las curvas

espectrales fue de 30 %.

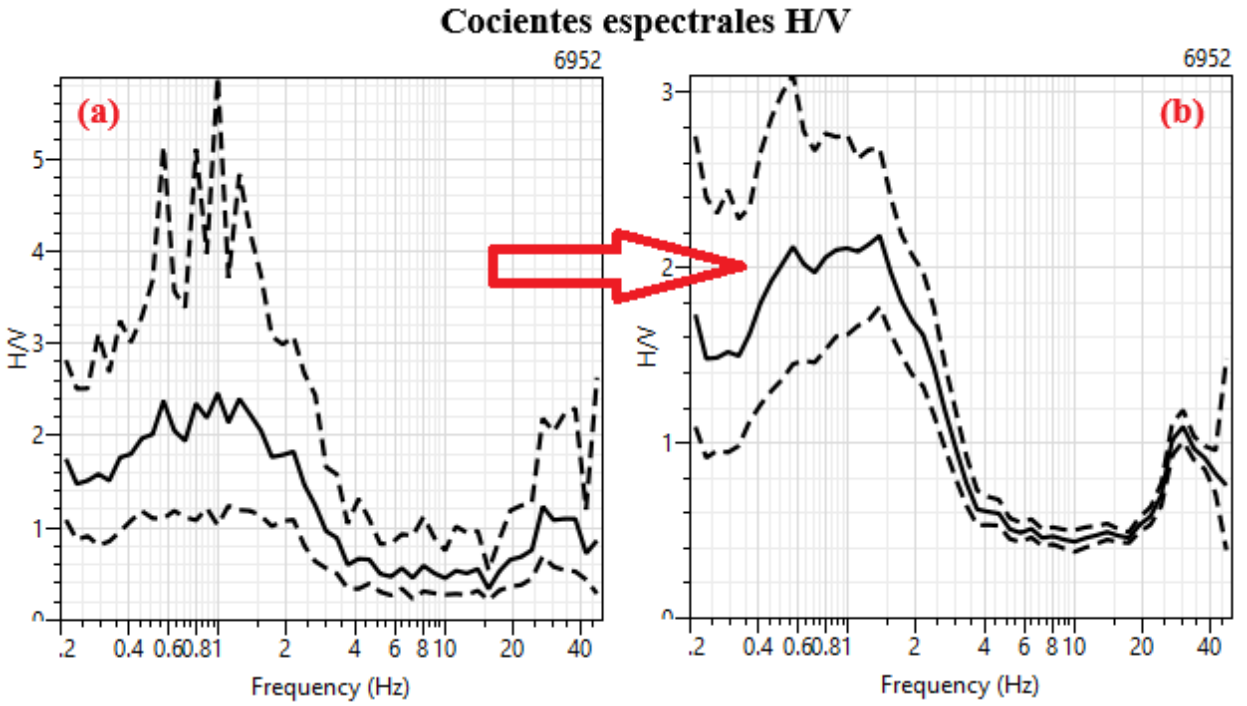


Figura 4.9: Ejemplo de cociente espectral sin suavizar (a) y cociente espectral suvizado mediante Konno Ohmachi al 30 % (b).

La siguiente cuestión para abordar es el tema del filtrado. Como es bien sabido, el ruido sísmico ambiental, está dividido en dos categorías: natural (microsismo) y humano (microtemblor). En el caso del ruido producido por microsismos y fuentes naturales, el contenido de frecuencias va de los 0.1 Hz A 0.5 Hz y sus orígenes pueden ser los océanos, tormentas, etc. Por otra parte, el ruido producido por actividad antropogénica suele tener un contenido de frecuencias mas amplio y con valores más altos que van de los 0.5 Hz hasta los 10 Hz, sin embargo, esto puede variar al tipo de metrópoli en la que se encuentra y la cercanía con esta actividad antropogénica. Por lo tanto, el filtrado de estas señales para el cálculo de la razón espectral fue de tipo pasa bandas, con frecuencias de corte entre 0.5 Hz a 15 Hz, considerando que la zona corresponde a una gran metrópoli y la ubicación del Museo se encuentra entre dos grandes avenidas con alta actividad.

Finalmente, el muestreo de las frecuencias es una parte crucial que afecta la visualización y resolución de las curvas espectrales al momento de analizarlas. Con este paso, definimos el rango de frecuencias que serán analizado. En este caso, se decidió mantener una frecuencia de muestreo de hasta 50 Hz.

Capítulo 5

Resultados

En el presente capítulo, se abordarán los resultados obtenidos a partir de las técnicas geofísicas utilizadas para la caracterización del subsuelo en el área que abarca el Museo del Carmen. Dichas técnicas se refieren a la evaluación de HVSR, interferometría sísmica, análisis de vibraciones direccionales derivado del método HVSR y algunos análisis espectrales para el monitoreo sísmico de algunas estructuras del Museo del Carmen.

5.1. Cocientes espectrales

5.1.1. H/V direccionales

Se estudiaron las relaciones espectrales H/V rotadas de los registros de ruido sísmico provenientes del Museo del Carmen, mismos que se utilizaron para calcular los cocientes espectrales comunes. De manera similar, se evaluó la razón espectral H/V, después de rotar las componentes en pasos de 10°, desde 0° (dirección norte) hasta llegar a 180° (dirección sur), de modo que, los resultados obtenidos en el rango de 0°-180° son una simetría del rango 180°-360°.

Cabe señalar, que este análisis ayuda a observar la orientación de las amplificaciones máximas y mínimas en cada estación, permitiendo relacionar esta información con la geología superficial, topografía, heterogeneidad del medio, entre otros. Los parámetros utilizados para obtener el H/V direccional es muy similar al utilizado para obtener los cocientes espectrales tradicionales.

El análisis de vibración direccional es útil para entender cómo responde el subsuelo según la dirección del movimiento, lo que nos da pistas sobre su posible anisotropía. Este análisis fue clave para elegir las estaciones más confiables, ya que se buscaron aquellas donde el cociente H/V mostrará un pico claro y estable en una frecuencia determinada, sin importar demasiado la dirección del ruido. Cuando se mantiene una amplificación alta y constante en una franja bien definida, se puede asumir que el ruido sísmico llega de forma más uniforme desde distintas direcciones, lo que da mayor confianza en los resultados obtenidos sobre la frecuencia fundamental del terreno (Figura 5.1).

Dicho lo anterior, se identificaron 9 estaciones (Figura 5.1), de un total de 20, que presentan una distribución uniforme del ruido en todas las direcciones a lo largo de una frecuencia específica. Por lo tanto, estos registros de ruido sísmico son confiables para calcular los cocientes espectrales y determinar las frecuencias fundamentales del terreno en el Museo del Carmen, obteniendo mejores resultados.

De acuerdo con los contornos obtenidos con la técnica ya mencionada, se puede observar que, en la mayoría de los casos hay una amplificación relativa característica que se encuentra entre 1 Hz y 2 Hz (Figura 5.1).

Las estaciones ubicadas en los exteriores del inmueble presentan dos direcciones preferenciales de 130° a 180° (SE-NW) y de 0° a 20° (NE-SW); sin embargo, es más evidente la primera dirección preferencial mencionada (SE-NW). La brecha que se encuentra entre las dos principales direcciones con mayor amplificación también presenta una franja de menor amplificación del H/V que une las dos direcciones máximas.

Derivado de los mencionado anteriormente, se pueden hacer algunas inferencias. Comenzando con las dos direcciones principales SE-NW y NE-SW, que en algunos casos son muy simétricas y nos sugieren que el contenido de frecuencia y campo de ondas no proviene de todas direcciones uniformemente, esto podría ser causa de la irregularidad y heterogeneidad que hay en el subsuelo del Museo del Carmen.

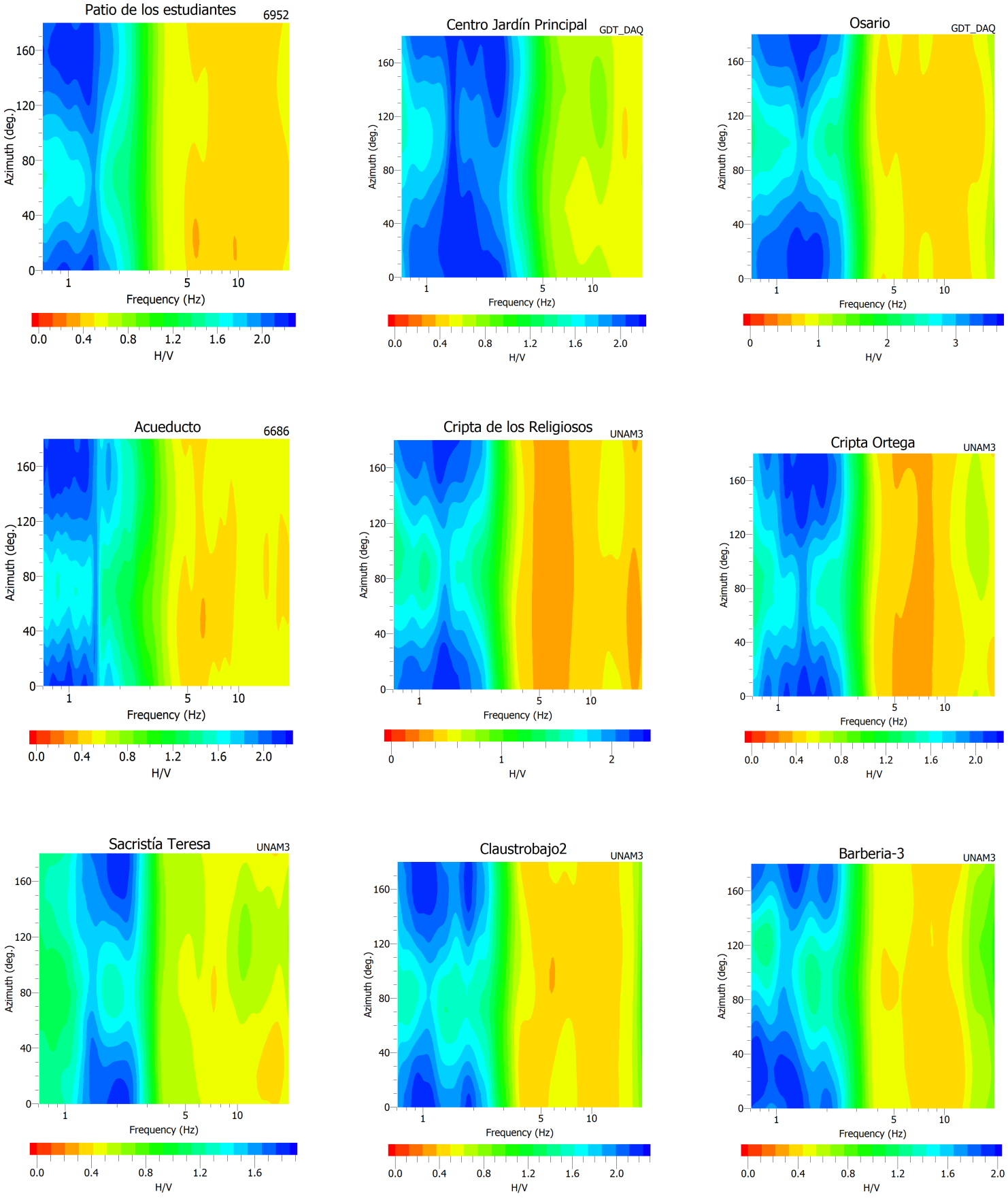


Figura 5.1: H/V direccionales de las nueve estaciones que presentan mejor distribución del ruido sísmico para obtener resultados más confiables respecto a la frecuencia fundamental del terreno

Por otro lado, la brecha que existe entre estas dos direcciones preferenciales desde 1 Hz a 1.5 Hz y que mantiene una amplificación, si bien, no igual pero relevante, podría estar indicando que en esas direcciones el terreno tiene un nivel mayor de anisotropía impidiendo la llegada de la energía con la misma intensidad que en las direcciones principales.

De las dos direcciones preferenciales, se mencionó que la más notable es la de SE-NW, es importante mencionar que esta dirección es transversal a las dos avenidas importantes entre las que se encuentra el Museo del Carmen (Insurgentes y Revolución) y también es transversal a algunos sistemas de fallas observados en la formación Tarango y otras fallas más lejanas, como la falla de Santa Catarina, que podrían estar contribuyendo al campo de ondas registrado por las estaciones colocadas en el área de estudio.

En cuanto a la topografía, recordemos que aumenta en dirección noroeste (NW). Tomando en cuenta lo anterior, es necesario señalar, que la amplificación comúnmente está relacionada con la focalización de las ondas sísmicas en la parte más alta de la colina, donde aumenta la difracción y reflexión de las ondas incidentes [D'Amico, 2013]. Sin embargo, este efecto no afectaría en gran medida a estas mediciones, debido a que la pendiente del sitio de interés no es elevada y la cima de la colina es lejana, pero no se debe despreciar este efecto en su totalidad.

Los resultados obtenidos del H/V rotado en las estaciones que se encuentran dentro del inmueble del Museo del Carmen, muestran una variabilidad de picos de amplificación máxima entre 1 Hz y 1.5 Hz en varias estaciones (Claustrobajos, Barberia, etc). La dispersión de estos picos de amplificación en ese rango de frecuencias puede deberse a fluctuaciones de las propiedades del suelo solido en distancias pequeñas. De forma general, podemos decir que el Museo del Carmen tiene un suelo muy heterogeneo. Como resultado colateral de este análisis, se identificaron las estaciones con mejor distribución de ruido en todas direcciones, asegurando un resultado más confiable y certero al calcular los H/V tradicionales.

5.1.2. H/V tradicional

En la evaluación efectuada con el método HVSR, se utilizó el algoritmo STA/LTA para la elección de las ventanas, cuya longitud es de 20 segundos para aquellos registros de 30 minutos y una longitud de ventana de 40 segundos para los registros de dos horas a tres horas. Los espectros de Fourier, calculados para cada ventana fueron suavizados con la ayuda de la ventana Konno-Omachi al 30 %. Esta evaluación se realizó en cada una de las nueve estaciones que fuerón identificadas con mejor distribución del ruido sísmico en la sección anterior.

Según los resultados obtenidos (Figura 5.2), los cocientes espectrales de todas las estaciones de ruido sísmico muestran una tendencia principal con respecto al promedio de las ventanas calculadas (línea negra continua), donde el máximo del cociente de las componentes horizontales entre la componente vertical ocurre entre 1.24 Hz hasta 1.42 Hz. Así mismo, la amplificación relativa de estas frecuencias fundamentales en los cocientes espectrales, oscila entre 1.85 y 3.52 veces.

En términos generales, se calculó un promedio de las frecuencias fundamentales y amplitudes relativas. Para el caso de la frecuencia fundamental, se obtuvo un promedio de 1.35 Hz y una amplificación relativa de 2.29. Estos valores promedio deben tomarse con cuidado, ya que, algunas estaciones están distribuidas dentro los inmuebles del Museo, algunas otras en zonas al exterior y algunas pocas en zonas consideradas como sótano del Museo debido a que se encuentran en partes del inmueble por debajo del nivel topográfico.

Estación	**Frecuencia[Hz]**	**Amplificación relativa**
Sacristía Teresa	1.38	1.85
Barberia-3	1.33	2.16
Osario	1.39	3.52
Cripta de los religiosos	1.24	2.26
Cripta Fam. Ortega	1.37	2.12
Centro Jardín	1.39	2.51
Acueducto	1.33	2
Patio de los estudiantes	1.32	2.15
Claustrobajo-2	1.42	2.04

Tabla 5.1: Tabla de resultados para cocientes espectrales en todas las estaciones del Museo del Carmen donde se registro ruido sísmico ambiental, obteniendo la frecuencia fundamental y amplificación relativa para cada una de ellas.

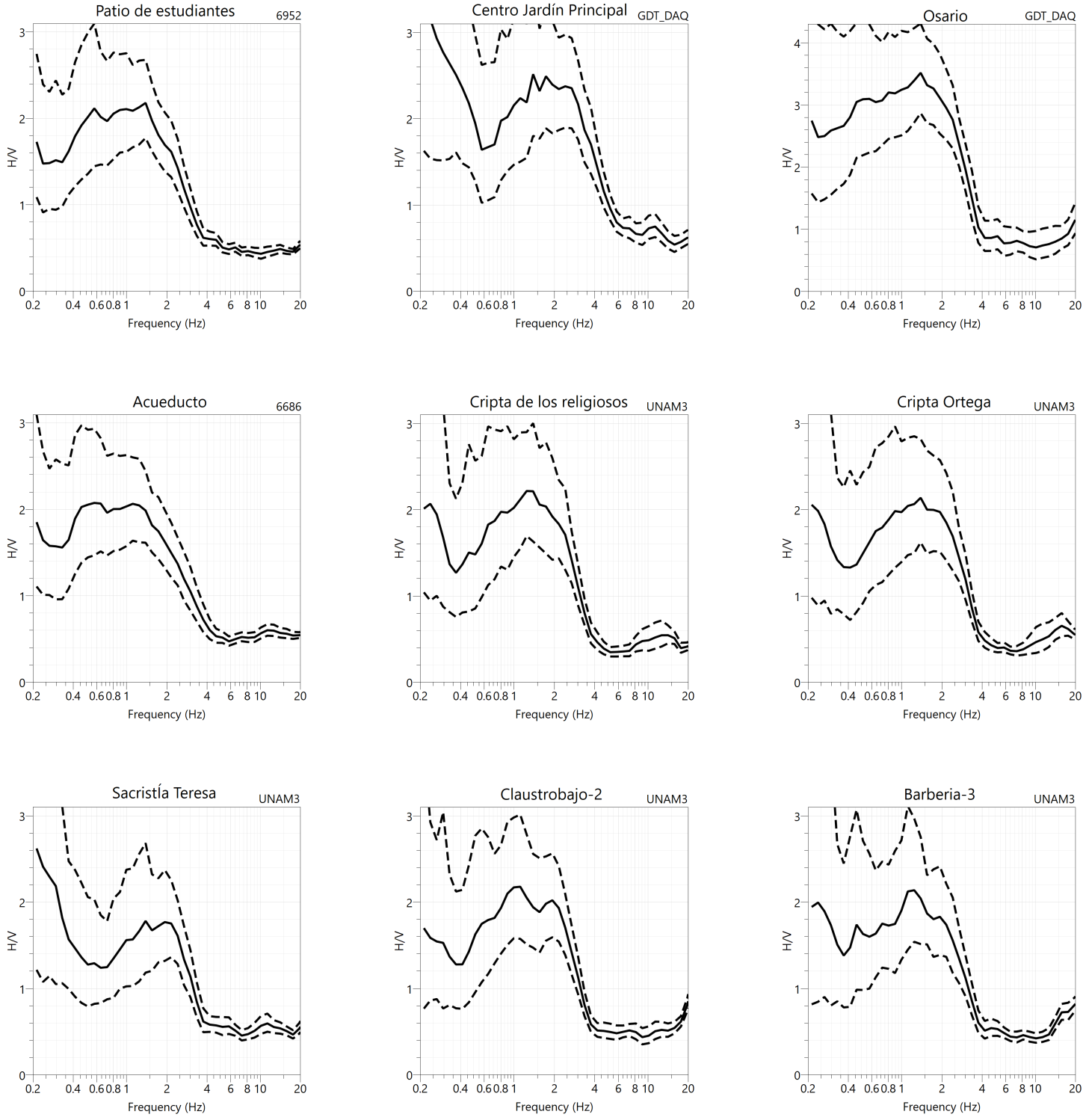


Figura 5.2: Cocientes espectrales comunes donde se observa la función de transferencia promedio (línea negra continua) con su respectiva desviación estándar (linea negra punteada).

Las estaciones que se encuentran ubicadas en exteriores, es decir, que se encuentran fuera de los inmuebles del Museo del Carmen, son: Centro jardín, Acueducto y Patio de los estudiantes. Ell resultado en estas estaciones nos arroja una frecuencia fundamental de 1.32 Hz a 1.39 Hz y una amplificación relativa de 2 a 2.51 veces. Las frecuencias de este tipo son características de suelos compuestos por materiales densos, en donde la amplificación observada en cada estación puede deberse al contraste pequeño entre las velocidades de la capa superficial (correspondiente a esas frecuencias fundamentales) y la capa que subyace. Dichas estaciones, al estar ubicadas en puntos fuera de inmuebles y al nivel topográfico correspondiente, es razonable pensar que la respuesta arrojada sobre la amplificación relativa y frecuencia fundamental corresponden al área de estudio.

En cuanto a la zonificiación de la Ciudad de México, en años pasados se logro identificar que la zona de loma (Zona I) tiene como características una frecuencia de resonancia entre 0.1 Hz a 1 Hz y una respuesta practicamente plana de 1 Hz a 10 Hz y una amplificación relativa que no rebasa las 2 veces. Por otro lado, la zona de transición, tiene un comportamiento para la frecuencia de resonancia que abunda entre 1 Hz a 2 Hz con amplificaciones relativas que se encuentran alrededor de las 10 veces [Martínez González, 2015].

De este modo, los resultados anteriores, indican que el área de estudio se encuentra clasificada en una zona de transición, debido a su frecuencia de resonancia que se encuentra entre 1.3 Hz y 1.39 Hz. Sin embargo, la zona presenta una amplificación relativa moderada, lo cual podría deberse al poco contraste en profundidad de impedancias entre los materiales del subsuelo. Aunado a esta situación, es necesario resaltar, que debido a la baja amplificación relativa, el efecto de sitio debería ser muy pequeño y los daños o movimientos fuertes dentro de los inmuebles del Museo del Carmen, pueden deberse más bien a problemas estructurales causados por la heterogeneidad y envejecimiento de la construcción de los inmuebles.

La estación que más llama la atención en este caso es el Osario, ya que, se observó una frecuencia fundamental de 1.39 y una amplificación de 3.52 veces. Al comparar estas respuestas, con las del terreno natural (estaciones al exterior), se puede observar que la frecuencia fundamental es muy similar y no tiene un cambio significante, por lo tanto, la capa que se encuentra por debajo del sótano permanece con las mismas características geológicas como en superficie. Por otro lado, no es el mismo caso para la amplificación relativa, dicha ampli-

ficación es mayor en el sótano que en las estaciones ubicadas en el exterior y que muestran la respuesta del terreno.

Dentro de este marco, se puede observar que las estaciones ubicadas en las criptas no tienen una amplificación relativa y frecuencia fundamental distinta a la que se observa en el terreno natural en superficie. La amplificación del cociente espectral en la estación del Osario (Figura 6.3), podría ser un indicador del estado actual del amortiguamiento del del inmueble en esta zona. La baja amortiguación en este punto podría deberse a un desgaste en los materiales con los que fue construido el sótano del inmueble o también por una heterogeneidad entre los elementos estructurales del sótano.

El resto de estaciones, se encuentran ubicadas dentro del inmueble del Museo del Carmen, todas en una planta baja y en todos los casos ya no existe un piso por encima. De forma general, los resultados observados corresponden a frecuencias fundamentales y amplificaciones relativas muy similares a las del terreno natural, observadas en las estaciones del exterior. Dicho lo anterior, parece que el resto de la estructura del convento se comporta de igual forma que la capa de suelo sobre la cual se encuentra toda la estructura del Museo del Carmen.

5.2. Correlaciones cruzadas y curvas de dispersión

Después del procesado de ruido sísmo con la técnica de interferometría sísmica se tienen cinco correlaciones cruzadas entre pares de estaciones que abarcan el area del Museo del Carmen. Si realizamos un análisis visual de las correlaciones cruzadas obtenidas entre los pares de estaciones. Estas funciones representan la respuesta del medio entre cada par de estaciones, como si una estación actuara como fuente sísmica virtual y la otra como receptor. En las imágenes se observa cómo la energía se organiza a lo largo del tiempo, destacando la simetría entorno al tiempo cero.

En los antecedentes del método se mencionó que, si se identifica que la correlación cruzada es causal o anticausal, es posible inferir la dirección predominante de propagación de las ondas sísmicas, así como la zona que presenta mayor densidad de fuentes de ruido sísmico. Las correlaciones cruzadas que se presentan como anticausales (Figura 5.4, apartados (a), (b) y

(e)), en las que la amplitud de la parte causal es menor que la de la parte anticausal, indican que la mayor densidad de fuentes de ruido sísmico se encuentra en dirección sureste. En consecuencia, esta también sería la dirección principal de propagación de la energía sísmica. Por otro lado, la correlación cruzada causal observada en la Figura 5.4 (apartado (c)) donde la amplitud de la parte causal es mayor, rompiendo la simetría también sugiere una dirección predominante hacia el sureste.

Sin embargo, una de las correlaciones muestra una inversión en la dirección del flujo energético (Figura 5.4, apartado (d)), puesto que presenta causalidad, indicando una dirección al noroeste de la zona de estudio. La presencia de esta correlación con comportamiento opuesto resalta la importancia de considerar las condiciones locales, como factores de topografía y estructuras urbanas que podrían influir en esta diferencia.

Antes de realizar la inversión de los datos manipulados mediante interferometría sísmica, es decir, las correlaciones cruzadas entre los pares de estaciones, fue necesario obtener sus respectivas curvas de dispersión.

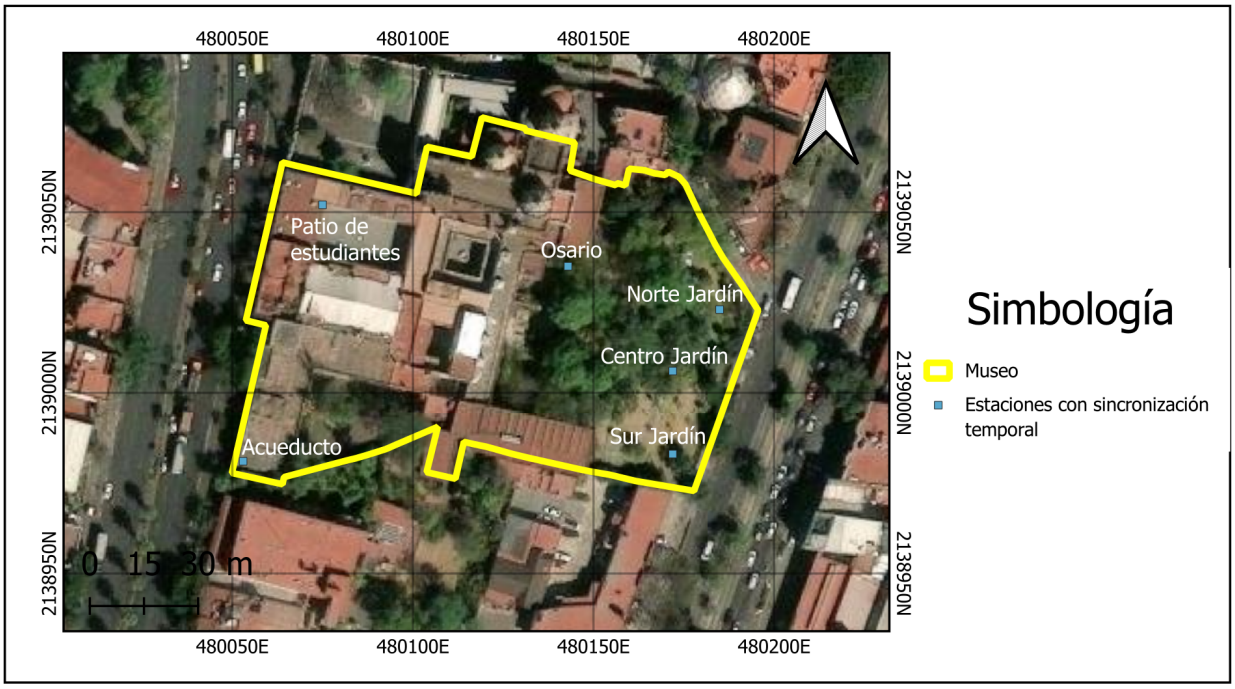


Figura 5.3: Estaciones utilizadas para realizar las correlaciones cruzadas, indicando su nombre, según el lugar donde se ubicarón.

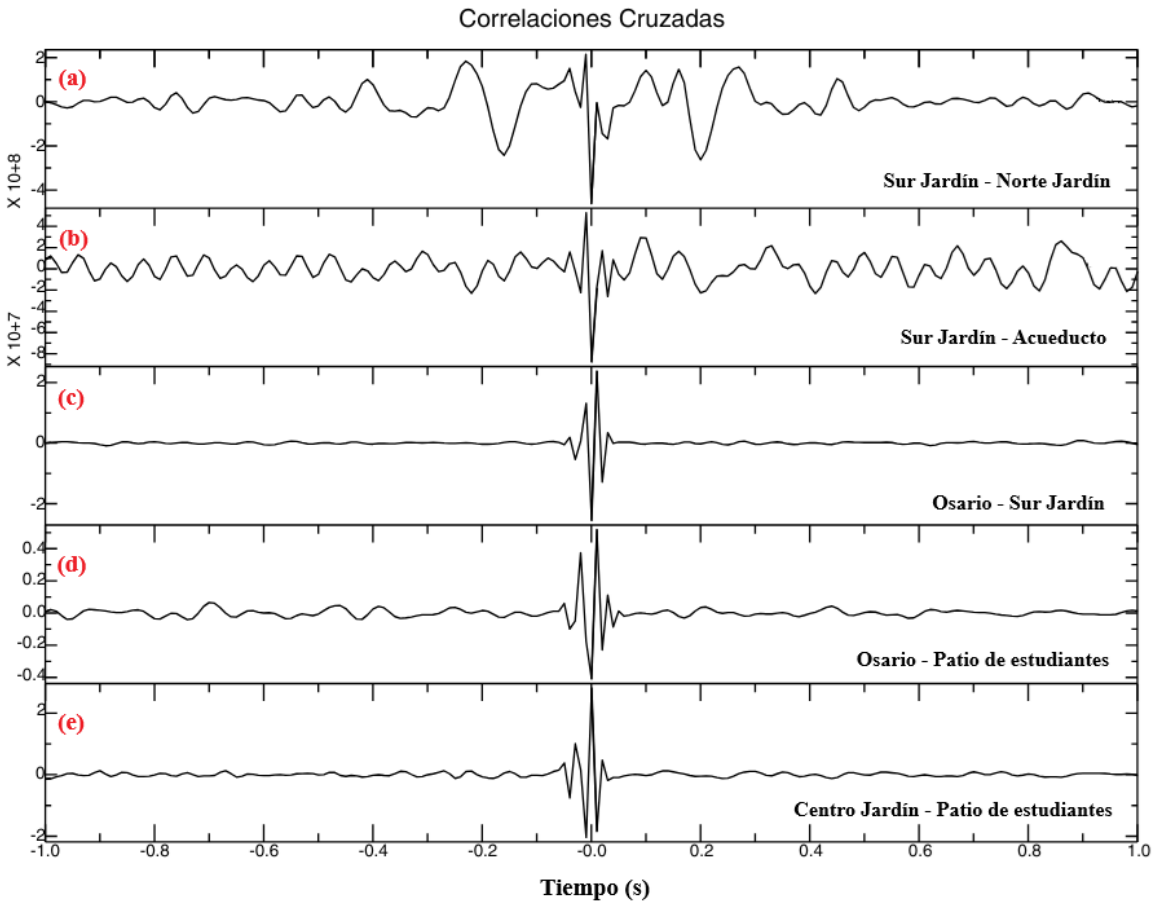


Figura 5.4: Correlaciones cruzadas entre cinco pares de estaciones distribuidas en el area del Museo del Carmen.

Las curvas de dispersión de cada correlacion cruzada fueron obtenidas con el programa Noise Dispersion Curve Picking [Granados et al., 2019], el cual trabaja con archivos en formato SAC. Este programa ofrece una interfaz de usuario bastante intuitiva y fácil de manejar, en la que se carga el conjunto de correlaciones sísmicas y posteriormente se realiza el picado de la curva de dispersión en el dominio temporal (Figura 5.5), ya sea en la parte causal o anticausal de la correlacion para obtener la curva de dispersión.

El modo fundamental en las ondas superficiales es importante, porque se trata de la forma más sencilla de propagación de las ondas. Este modo se caracteriza por transportar mayor energía y por ofrecer una señal más estable en comparación con los modos superiores. Además, su comportamiento tiene una relación directa con las propiedades del subsuelo, lo que lo convierte en una herramienta confiable para generar curvas de dispersión que representen con precisión cómo varían las velocidades de onda de corte (Vs) con la profundidad.

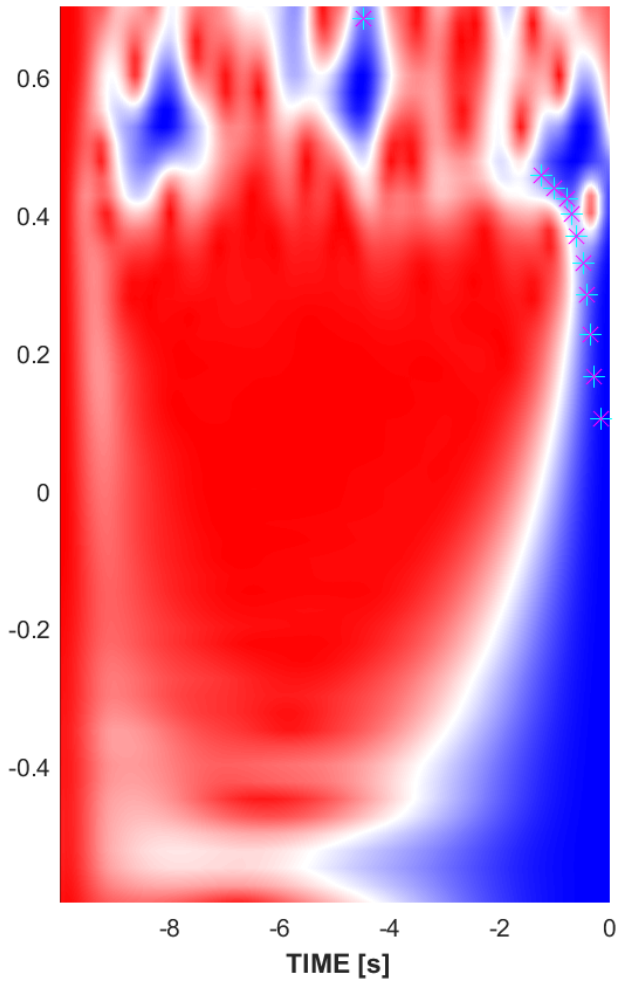


Figura 5.5: Ejemplo de adquisición de una curva de dispersión en el programa NDCP. Se observa la sección anticausal de la correlación, donde se realiza el picado del modo fundamental.

Una vez hecho el picado de cada correlación cruzada, se obtiene una curva de dispersión que muestra cómo varía la velocidad de corte (Vs) según la frecuencia. En otras palabras, esta curva refleja cómo cambian las velocidades de las ondas superficiales conforme se propagan.

Es importante interpretar con criterio las curvas de dispersión obtenidas mediante el software NCDP, puesto que en algunos casos el modo fundamental seleccionado puede incluir frecuencias que no son del todo confiables, dependerá del tipo de método geofísico utilizado. Este aspecto, relacionado con la confiabilidad de las frecuencias en las curvas de dispersión, será abordado más adelante en la sección correspondiente al proceso de inversión debido a que tiene que ver con el modelado de capas del subsuelo a partir de la curva de dispersión.

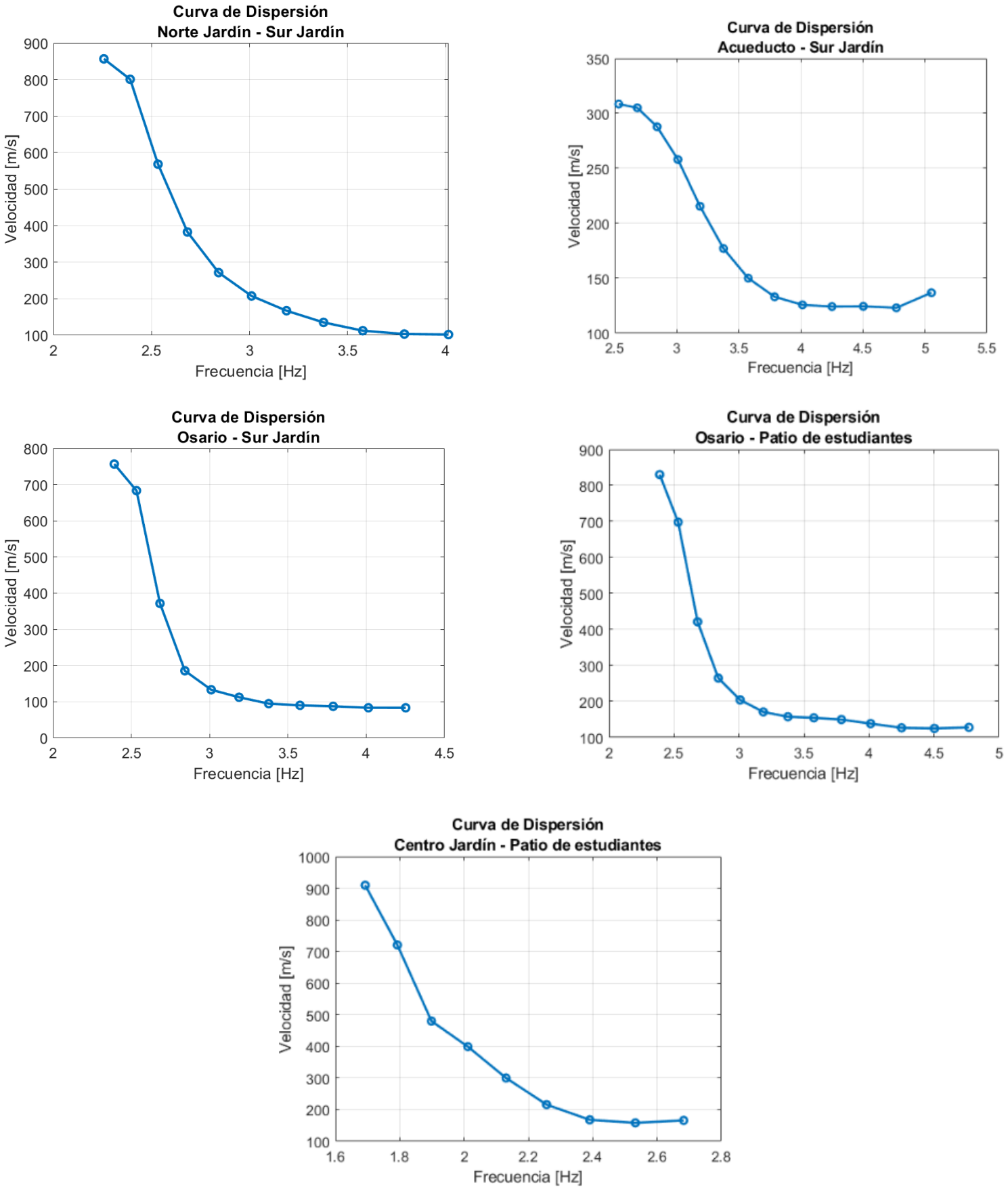


Figura 5.6: Curvas de dispersión obtenidas con NCDP a partir de las correlaciones cruzadas.

5.3. Inversión de datos

Los modelos de velocidades de capa en el subsuelo del Museo del Carmen se obtuvieron con la inversión de los datos procesados con distintas técnicas, se utilizaron dos softwares principales. En el caso de la inversión de los datos procesados con la técnica de cocientes espectrales, se optó por hacer uso del software HVInv [Piña Flores and García Jerez, 2018]. De manera similar, las curvas de dispersión obtenidas con el método de interferometría sísmica fueron invertidas con ayuda del paquete de MASWaves [Ólafsdóttir et al., 2018].

5.3.1. Inversión de curvas de dispersión

Una vez obtenidas las curvas de dispersión, es posible llevar a cabo su inversión para obtener el modelo de capas del subsuelo. Sin embargo, es importante considerar que estas curvas reflejan la variación de la velocidad de las ondas en función de la frecuencia (Figura 5.6), y cada frecuencia está asociada con una determinada profundidad de penetración en el subsuelo debido a que $\lambda = v/f$ y $z = \lambda/2$, donde λ, v, f y z se refieren a la longitud de onda, velocidad, frecuencia y profundidad respectivamente.

La separación entre estaciones en las correlaciones realizadas varía entre un máximo de 120 metros y un mínimo de 40 metros. Este aspecto es crucial, ya que la separación máxima entre pares de estaciones determina la longitud de onda máxima que puede registrarse entre dichas estaciones y, en consecuencia, la profundidad máxima confiable que puede alcanzar nuestro modelo de capas. Como resultado de la inversión de las curvas de dispersión, esta profundidad máxima confiable corresponde aproximadamente a la mitad de dicha longitud de onda máxima [Choon, 2015].

Las curvas de dispersión obtenidas muestran velocidades en frecuencias que sugieren una profundidad mucho mayor a la profundidad máxima confiable. Por ello, al calcular los modelos de capas para la inversión, se consideró toda la curva de dispersión con el objetivo de obtener un modelo con el menor error posible. Sin embargo, en el programa MASWaves, los parámetros de inversión fueron configurados para que el modelo de capas solo se muestre hasta la profundidad confiable, determinada según la separación máxima entre pares de estaciones.

Tomando las consideraciones anteriores, se realizó el cálculo de un modelo por curva de

dispersión, es decir, se realizaron 5 modelos para poder invertir las 5 curvas de dispersión correspondientes a la correlación cruzada entre un par de estaciones. Las curvas de dispersión, al estar en función de la velocidad de grupo y de la frecuencia, se puede determinar gráficamente los puntos de inflexión, que representarían el cambio de una capa a otra, en el subsuelo. De este modo, con la longitud de onda máxima (ecuación 6.1) calculada con los puntos de inflexión de la curva de dispersión, se puede calcular un modelo de capas considerando que la longitud de onda máxima en una capa es una tercera parte de la profundidad de la capa (ecuación 6.2). Cabe señalar, que las curvas de dispersión obtenidas corresponden a curvas características de tres capas, por ende, se calcularon modelos de este número de capas.

$$\lambda_{max} = \frac{c_{max}}{f_{min}} \tag{5.1}$$

$$Z_{max} = \frac{\lambda_{max}}{3} \tag{5.2}$$

Donde c_{max} se refiere a la velocidad de fase máxima en la capa, f_{min} la frecuencia mínima en la misma capa y λ_{max} a la longitud máxima. Dicho lo anterior, se obtuvieron los 5 modelos que se utilizaron para invertir las curvas de dispersión de la correlación cruzada entre pares de estaciones con ayuda de MASWaves. Los modelos utilizados están reflejados en la Tabla 5.2.

	Capa 1		**Capa 2**		**Capa 3**	
Estaciones	Z_{max}	**Espesor**	Z_{max}	**Espesor**	Z_{max}	**Espesor**
Norte Jardín - Sur Jardín	8.4	8.4	47.5	39.1	126.5	79
Acueducto - Sur Jardiín	9.03	9.03	28.5	19.4	45.5	17
Osario - Sur Jardín	6.6	6.6	46.2	39.6	105.5	59.3
Osario - Patio de estudiantes	9	9	52.3	43.3	124.8	72.5
Centro Jardín - Patio de estudiantes	20.6	20.6	84.2	63.6	193.2	109

Tabla 5.2: Modelos de capas para la invsersión de curvas de dispersión, producto de la interferometría de ruido sísmico.

Una vez establecidos estos parámetros, se logró obtener un modelo de velocidades para la onda de corte correspondiente a cada capa del subsuelo. Cada modelo de velocidades calculo 400 iteraciones para determinar un resultado confiable al momento de interpretarlo. Los resultados observados en la tabla 5.3, muestran que todas las correlaciones calculadas entre pares de estación arrojaron resultados bastante similares, sobre todo para la primera capa

que corresponde a la que alcanzaron a captar en todos los pares de estación, teniendo un espesor entre 17 y 20 metros, con una velocidad de corte V_s entre 120-160 m/s. Para la segunda capa, el espesor no es visible, ya que ninguna estación tiene la suficiente separación para alcanzar a ver su limite inferior, sin embargo, la velocidad que caracteriza esta capa se encuentra alrededor de los 250 a 400 m/s

	Capa 1		**Capa 2**		**Capa 3**	
Correlación	V_s	**Espesor**	V_s	**Espesor**	V_s	**Espesor**
Norte Jardín - Sur Jardín	120	17	355	N/A	N/A	N/A
Acueducto - Sur Jardiín	122	17.5	360	N/A	N/A	N/A
Osario - Sur Jardín	125	18	400	N/A	N/A	N/A
Osario - Patio de estudiantes	155	130	310	N/A	N/A	N/A
Centro Jardín - Patio de estudiantes	160	20	250	N/A	N/A	N/A

Tabla 5.3: Resultados obtenidos de la inversión de las curvas de dispersión, a partir del método de interferometría sísmica. Los campos asignados con N/A son aquellos donde la inversión no arroja datos que se puedan afirmar con certeza ese parametro.

La capa más superficial (capa 1) tiene velocidades características muy bajas. Las velocidades de ondas de corte (V_s) en suelos, que se encuentran por debajo de los 180 m/s, suelen ser suelos blandos, compuestos por depósitos aluviales, arcillas blandas y arenas sueltas, es decir, son suelos incompetentes producto de la baja consolidación, compactación y en algunos casos alta porosidad del suelo. Cabe señalar, que los suelos incompetentes tienen mayor potencial para amplificar las ondas sísmicas, por lo tanto, dichos suelos aumentan el riesgo sísmico.

Para la velocidad de la capa intermedia (capa 2) aumenta y se mantiene entre el rango de 180-360 m/s o en algunas inversiones, ligeramente por encima. En este caso, las velocidades que se encuentran dentro de este rango son características de suelos medianamente rígidos y que su aumento de velocidad se debe más que nada a la mayor compactación que sufren los materiales conforme su profunidad, así mismo, estas velocidades se presentan en materiales con densidad regular y parcialmente consolidados. Se espera que la capa 3 aumente su velocidad y que el espesor de la segunda capa descrita anteriormente se resuelva con la inversión de los cocientes espectrales, así mismo, se espera que la inversión de cocientes espectrales confirme los resultados obtenidos con la interferometría sísmica.

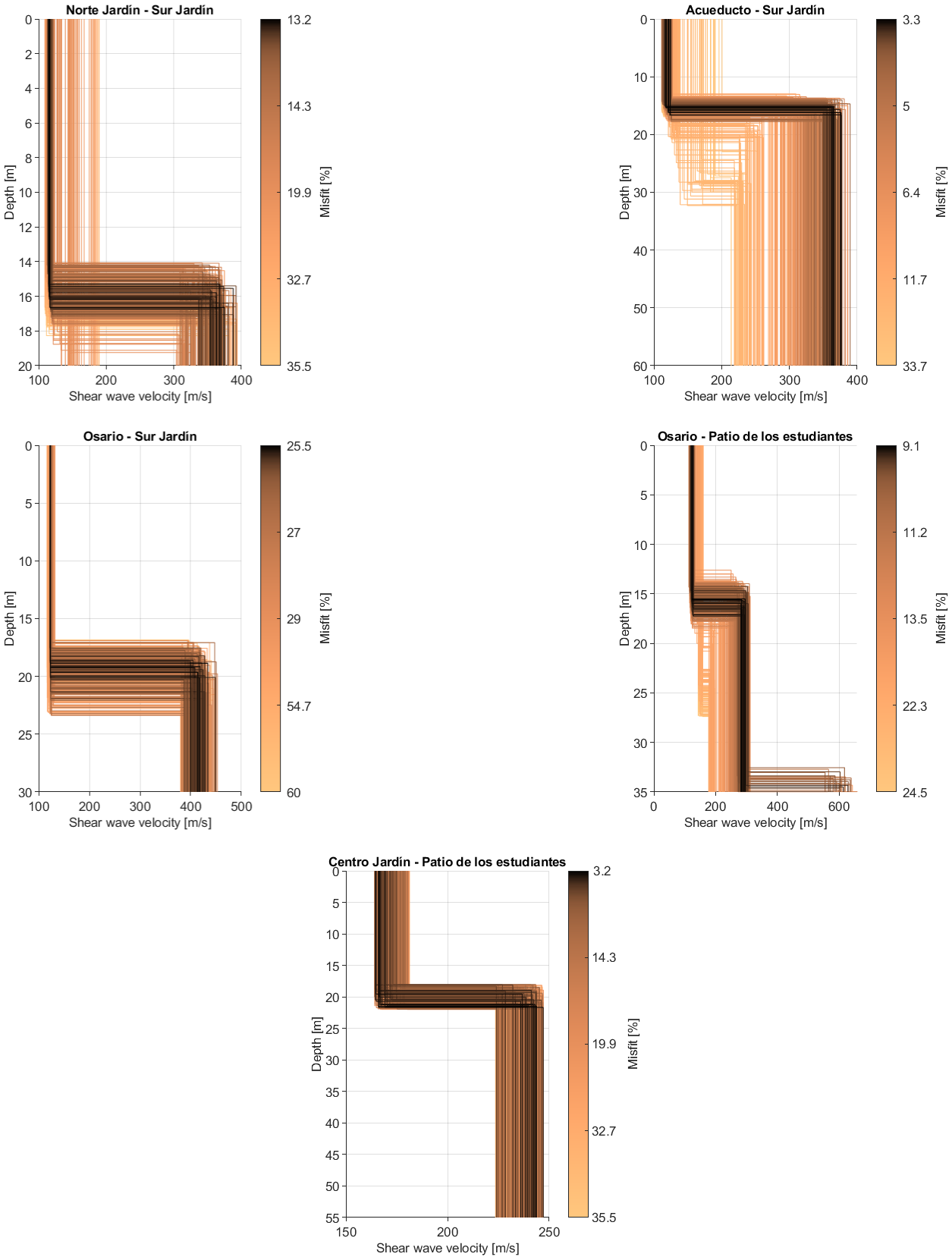


Figura 5.7: Inversiones de las curvas de dispersión de cada correlación cruzada entre pares de estaciones. La profundidad de cada modelo de capas varia dependiendo la distancia entre estaciones.

5.3.2. Inversión conjunta

La inversión de los cocientes espectrales de las estaciones del Museo del Carmen se realizó con el programa HVInv [Piña Flores and García Jerez, 2018] el cual nos permite modelar la curva de H/V proponiendo un modelo de capas con sus respectivos parámetros físicos; espesor, V_p, V_s, densidad y número de Poisson. Como se muestra en la figura 3.2, la distancia entre estaciones no es grande y el área de estudio es lo suficientemente pequeña para dar por hecho que la geología del subsuelo no cambia, lo cual se ve reflejado en la similitud de los cocientes espectrales de las estaciones ubicadas en el exterior del museo. Por lo tanto, se escogió la estación ubicada en el Osario y Acueducto para invertir sus datos y obtener el perfil de velocidades a profundidad.

Los modelos representados en la tabla 5.4 fueron hechos tomando en cuenta la información geológica de la zona de estudio y con los resultados obtenidos anteriormente con interferometría sísmica, además de que fueron los que empataron de mejor forma con su respectiva curva H/V.

	Acueducto		
	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Espesor [m]	22.5	52	82
$V_s[m/s]$	127	297	380
Densidad $[kg/m^3]$	1600	1720	1890
	Osario		
	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Espesor [m]	20	51	74
$V_s[m/s]$	117	300	410
Densidad $[kg/m^3]$	1605	1800	2110

Tabla 5.4: Modelos de capas para la inversión de cocientes espectrales en las estaciones de Acueducto y Osario.

Cabe señalar, que las estaciones de Acueducto y Osario se encuentran a distintas elevaciones debido a la topografía de la zona de estudio que no es tan distinta pero es reflejada en el espesor de la capa 1 de los dos modelos ajustados, este detalle sirve como evidencia de como la forma de las curvas espectrales refleja las propiedades de las capas del subsuelo.

La inversión de los datos utilizó el método Monte Carlo, realizando 100 iteraciones las cuales fueron promediadas para obtener el perfil final de velocidades y espesores de capas. Los

resultados de la inversión de los cocientes espectrales se presentan en la tabla 5.5, la cual refleja tres capas principales, la más superficial entre 20 y 21 metros de espesor con una velocidad de onda de corte (V_s) entre 120 a 128 m/s, la segunda capa con un espesor variable entre 56 a 71 metros con velocidades de onda de corte entre 297 a 300 m/s y finalmente una capa más profunda con espesores entre 79 y 81 metros con velocidades de onda de corte entre 380 a 410 m/s.

	Capa 1		**Capa 2**		**Capa 3**	
Correlación	Espesor [m]	$V_s[m/s]$	Espesor [m]	$V_s[m/s]$	Espesor [m]	$V_s[m/s]$
Acueducto	21	128	56	297	79	380
Osario	20	120	71	300	81	410

Tabla 5.5: Resultados obtenidos de la inversión de los datos de curvas espectrales, representados por un perfil de velocidades de onda de corte V_s de tres capas.

En resumen, podemos decir que la inversión conjunta ha definido tres posibles capas principales en el subsuelo (Figura 5.8). Los resultados obtenidos mediante la interferometría sísmica y los cocientes espectrales arrojaron resultados similares en ambas metodologías, ya que, los rangos de velocidad para cada capa se mantienen en un rango compacto, lo que indica mayor confiabilidad en los resultados. Cabe señalar, que la inversión de los cocientes espectrales proporciono información acerca de la densidad estimada de las capas 1, 2 y 3, obteniendo 1600 kg/m^3, 1700 kg/m^3, y 2000 kg/m^3, respectivamente.

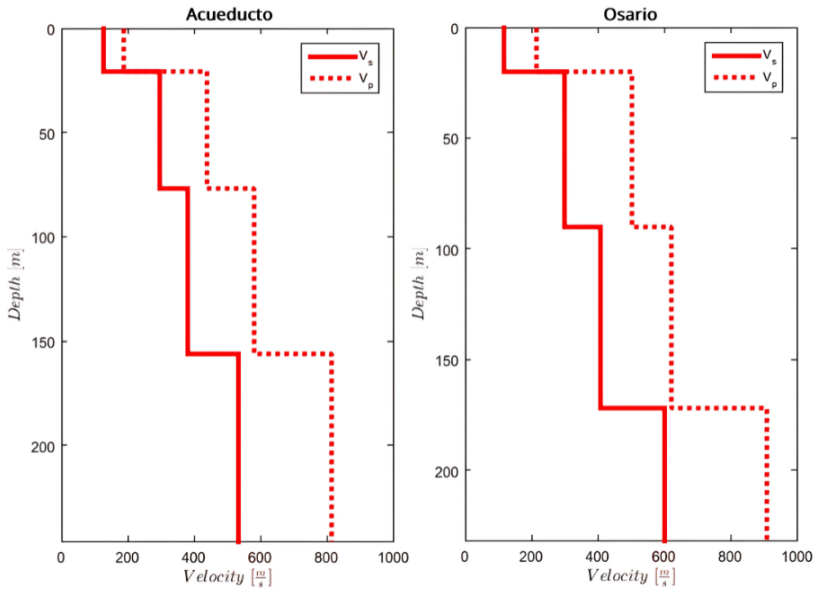


Figura 5.8: Perfil de velocidades de onda de corte V_s obtenido a partir de la inversión de los resultados del método H/V.

5.4. Modelo del subsuelo

En este estudio se presenta un modelo del subsuelo para la zona del Museo del Carmen, ubicado en el suroeste de la Cuenca de México. Este modelo es el resultado de la combinación de dos enfoques geofísicos: la inversión de las curvas de dispersión obtenidas a partir de las correlaciones cruzadas y la inversión de los cocientes espectrales H/V (según el método de Nakamura). Ambos métodos nos permitieron estimar las velocidades de onda de corte (Vs) y las densidades de las capas del subsuelo, así como delinear la geometría de las diferentes unidades que lo conforman.

En la figura 5.9 se muestra el modelo que se obtuvo, el cual cuenta con tres capas principales en el subsuelo, con diferentes espesores y características en cuanto a sus velocidades. Los modelos 1D obtenidos en la sección anterior tienen una profundida mínima de 20 metros, lo que permitió una descripción bastante precisa de la capa superficial y su transición hacia materiales más profundos y consolidados.

El análisis del modelo nos permite distinguir tres capas en función de su velocidad de onda de corte (Vs) y densidad. Estas capas se interpretan en el contexto geológico local y se describen de la siguiente manera:

1. **Primera capa**: Es la capa más superficial, con velocidades que van desde 120 hasta 160 m/s y una densidad de 1600 kg/m^3 . Se trata de una unidad de baja rigidez, posiblemente compuesta por materiales blandos como depósitos lacustres o rellenos recientes. Su espesor varía a lo largo del área, alcanzando hasta 20 metros en algunas zonas.

2. **Segunda capa**: Se encuentra debajo de la primera, con velocidades entre 300 y 350 m/s y una densidad de 1800 kg/m^3 . Este nivel podría estar formado por sedimentos aluviales más consolidados o tobas compactadas, lo que le otorga mayor rigidez y una mayor capacidad para resistir deformaciones.

3. **Tercera capa**: Es la más profunda y la más rígida, con velocidades entre 380 y 410 m/s y una densidad de 2100 kg/m^3 . Se trata de un material probablemente volcánico, que podría corresponder a flujos de lava del volcán Xitle o unidades rocosas más antiguas.

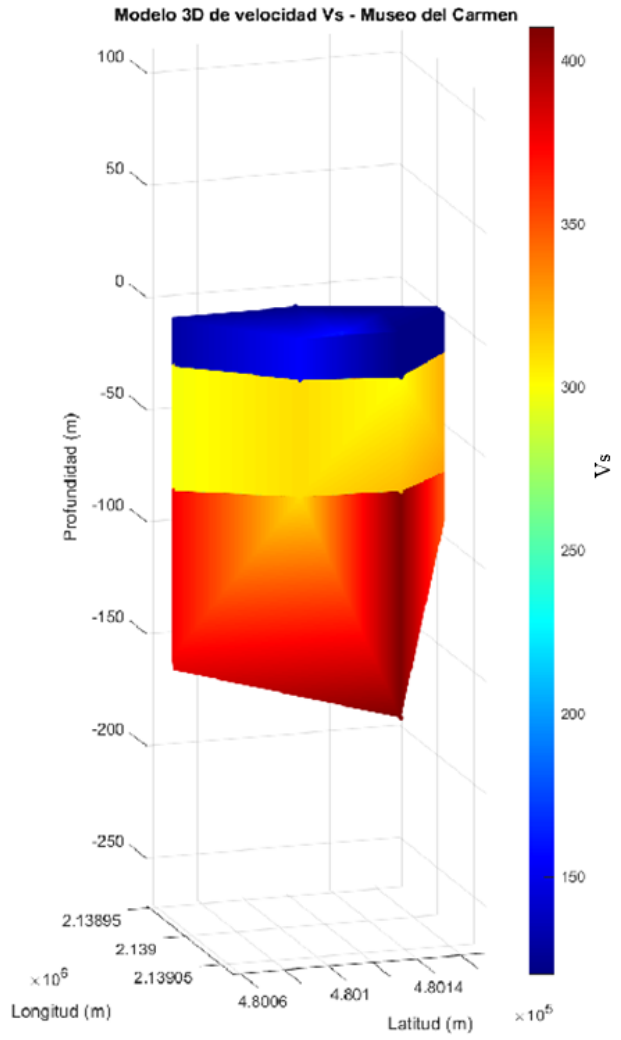


Figura 5.9: Modelo del subsuelo del Museo del Carmen, los colores muestran la variación de velocidades de onda de corte (Vs).

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que en 2020 publicó un mapa de espesores de la capa superficial del subsuelo en la Ciudad de México [Lermo Samaniego et al., 2020]. Este estudio indica que en la zona del Museo del Carmen, el espesor de la capa superficial oscila entre 0 y 20 metros, lo cual concuerda muy bien con el espesor de la primera capa obtenida en el presente modelo.

Sin embargo, el modelo tiene algunas limitaciones derivadas de las metodologías y las condiciones del estudio. La inversión de curvas de dispersión fue útil para caracterizar principalmente la primera capa, pero debido a la limitación en la separación entre estaciones, no fue posible obtener una resolución suficiente para profundizar en las capas más profundas.

Aunque la segunda capa no se resolvió completamente en términos de espesor, la inversión permitió estimar con cierto grado de certeza en velocidades de la zona

Por otro lado, la inversión de cocientes espectrales H/V permitió llegar a una mayor resolución en profundidad, donde se muestran tres capas con características bien definidas. La primera capa coincide en espesor y velocidad con los resultados de la inversión de curvas de dispersión, mientras que la segunda capa presenta velocidades consistentes con las de la inversión anterior. La tercera capa, que no fue visible en la inversión de curvas de dispersión, se logró identificar gracias a los cocientes espectrales, lo que subraya la importancia de emplear métodos complementarios para mejorar la caracterización del subsuelo.

A pesar de las limitaciones inherentes al estudio, el modelo propuesto es coherente con los datos anteriores y proporciona una base sólida para comprender la estructura geológica de la zona del Museo del Carmen.

5.5. Monitoreo sísmico

Se realizó un análisis espectral de ruido sísmico en tres ubicaciones distintas del Museo del Carmen: Una de ellas en el segundo nivel del edificio administrativo, otra en un sótano más conocido como Osario y otra a un costado de la cupula de la iglesia. Las mediciones que fueron utilizadas para este análisis abarcan el periodo del 19 de junio al 23 de junio para el caso del edificio admionistrativo y del 01 de julio al 21 de julio en el caso de la cupula de la iglesia, con el objetivo de determinar algunas características estructurales de las tres distintas ubicaciones.

Cabe señalar, que en dicho edificio administrativo se han reportado movimientos fuertes durante eventos sísmicos por las personas que laboran en dicho lugar, específicamente en su segundo nivel donde está ubicada una de las estaciones y en donde el muro de la figura 5.10, que se encuentra perpendicular a la orientación Este-Oeste fue reconstruido por daños que sufrió con anterioridad, es decir, es un muro heterogéneo con materiales de distintas épocas y por lo tanto, diferentes edades.



Figura 5.10: Muro del edificio administrativo que ha sido resanado (lineas rojas) en otras ocasiones debido a fracturas y derrumbes parciales durante eventos sísmicos

En la figura 5.11, se aprecia el espectrograma que corresponde a la estación ubicada en el segundo nivel revelan una banda frecuencia dominante de 3 Hz durante todo el periodo de tiempo, alcanzando amplitudes de 85 unidades la cual es significativamente mayor al resto de frecuencias. Se observa un patrón de ligera disminución en la amplitud de los espectrogramas durante las noches, lo que evidencia la disminución de actividad antropogénica.

Del igual forma, en la figura 5.12 el espectrograma ubicado en el Osario muestra una banda de frecuencia dominante en 2.5 Hz con amplitudes máximas de 67 unidades, inferiores a las registradas en el piso alto. La amplitud de la banda de frecuencia dominante inferior a los demás espectrogramas del piso alto se puede atribuir al contacto directo que tiene esta ubicación con el suelo. De forma similar, se observa el mismo patrón de amplitud durante los días y noches.

De forma general, la banda de frecuencia de 3 Hz es el primer modo fundamental de resonancia del edificio, mientras que la banda de frecuencia observada en 2.5 de la estación del Osario se atribuye a las propiedades dinámicas de la zona de estudio, asi como sus respectivas

amplitudes.

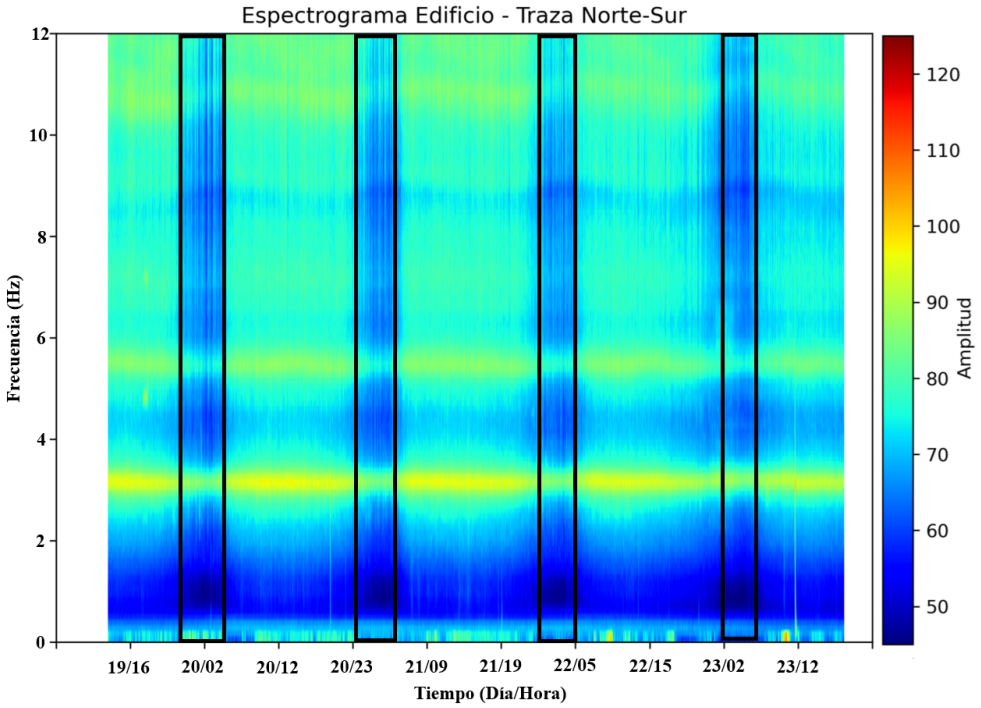


Figura 5.11: Espectrograma de la dirección Norte-sur correspondiente a la estación del segundo nivel del edificio administrativo.

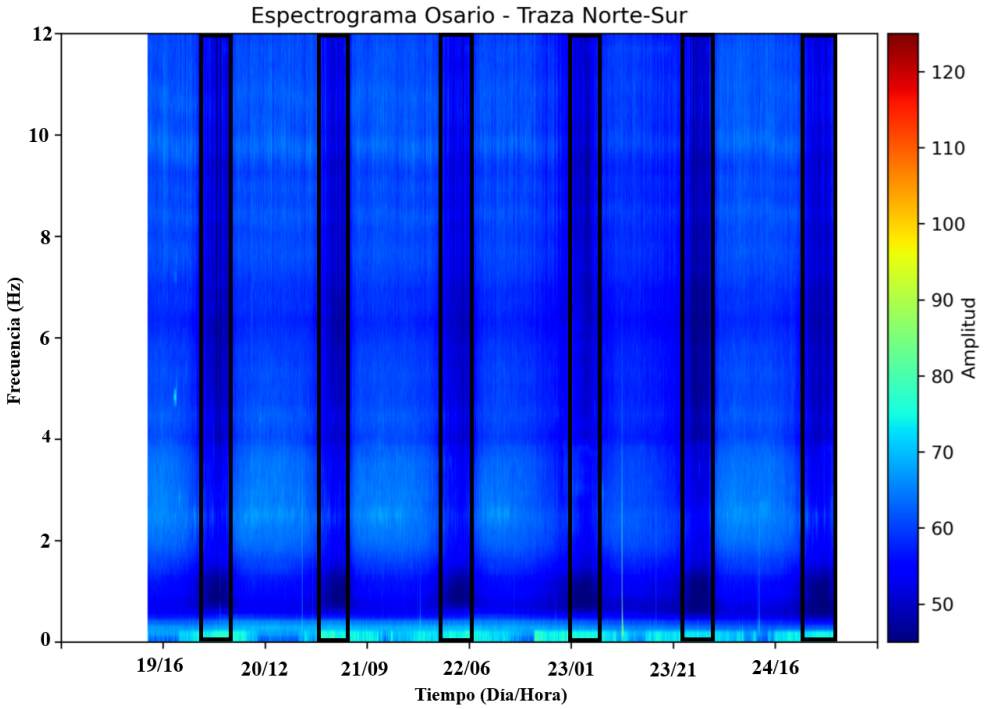


Figura 5.12: Espectrogramas de la dirección Norte-sur de la estación ubicada en el Osario.

Para complementar esta idea y se tenga una visualización más clara del comportamiento de

la frecuencia en el Museo del Carmen, en la figura 5.13 y 5.14 se muestra un análisis similar de las estaciones ubicadas en el segundo piso del edificio administrativo y el costado de la cupula de la iglesia. En la figura 5.13 se puede observar un patrón cíclico día-noche de la frecuencia natural que toma el edificio, en donde la frecuencia aumenta hasta 3.13 Hz durante las noches (recuadro gris) y disminuye durante los días (recuadro blanco) hasta 3.08 Hz. Así mismo, es importante notar que las amplitudes relacionadas en estos patrones aumentan en el periodo del día, mientras que en el periodo de las 18:00 horas a las 06:00 horas del día siguiente las amplitudes de la frecuencia natural del edificio son bajas.

Es importante mencionar que todas las amplitudes que muestran el comportamiento de los distintos cuerpos del Museo del Carmen, estan normalizadas respecto a todo el periodo de cada registro.

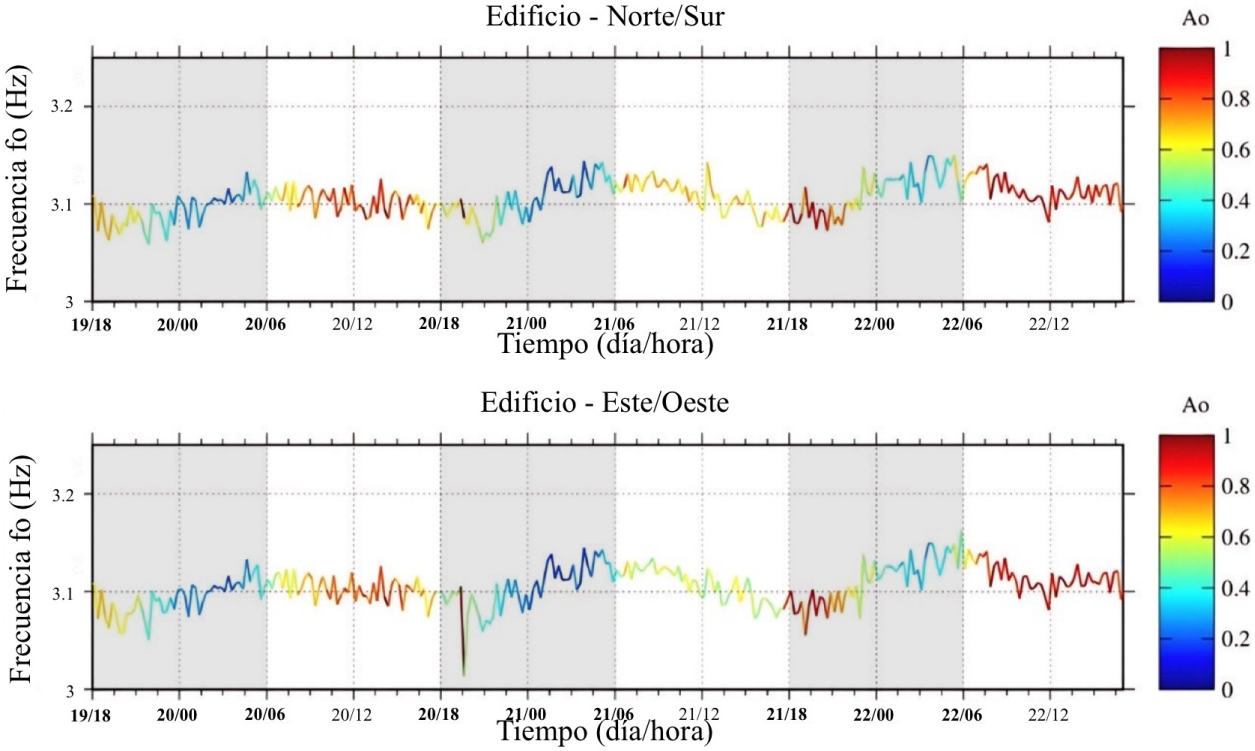


Figura 5.13: Evolución de la frecuencia del edificio administrativo a lo largo del tiempo. Evidente patrón donde la frecuencia aumenta durante los días (recuadro blanco).

De forma similar, en la imagen 5.14, se observan estas variaciones día-noche que también están presentes en el edificio administrativo. Cabe señalar, que la frecuencia natural que presenta la estación a un costado de la cúpula de la iglesia fue captada en un periodo diferente que la del edificio administrativo, es un registro más grande de casi un mes de duración,

por ello, las variaciones día-noche se ven a diferente escala en esta figura pero estan presentes.

De forma más específica, podemos observar que entre las 18:00 y 06:00 horas, la frecuencia presenta una tendencia ascendente, es decir, muestra una pendiente positiva, mientras que las amplitudes se mantienen en valores relativamente bajos, representadas por tonalidades azules en la gráfica. Posteriormente, entre las 06:00 y 18:00 horas, la frecuencia exhibe un comportamiento descendente, con una pendiente negativa, acompañado de amplitudes moderadas a altas durante este intervalo. Finalmente, entre las 18:00 y 06:00 horas, la frecuencia comienza a aumentar de manera gradual, mientras que las amplitudes disminuyen paulatinamente.

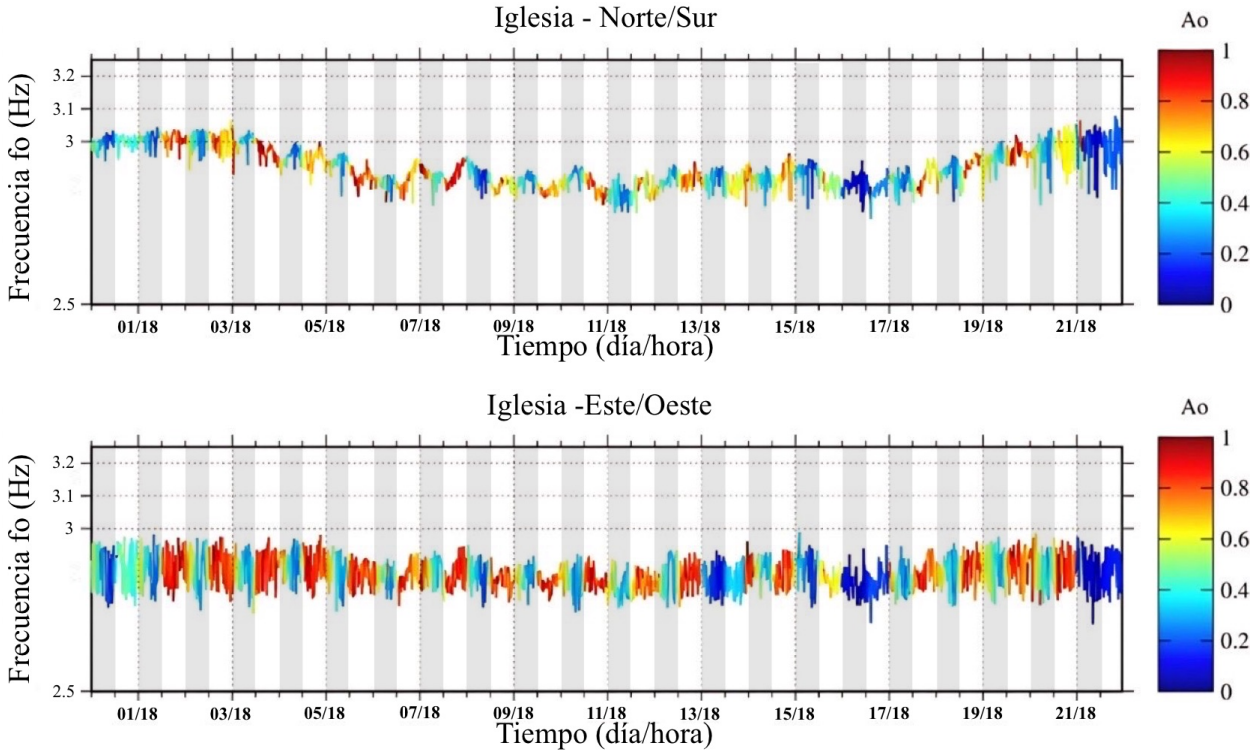


Figura 5.14: Frecuencia natural en la estación ubicada a un costado de la cupula de la iglesia. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día.

En estudios anteriores, se ha logrado identificar que las estructuras se ven comprometidas en sus parámetros dinámicos debido a la carga estructural que sufren [Ortiz et al., 2012], de tal forma que los experimentos que se han realizado en años anteriores presentan resultados que respalda la idea que la carga estructural disminuye la frecuencia natural de la misma estructura, mientras que la frecuencia natural aumenta cuando la estructura es liberada de dicha carga.

Aunado a la situación anterior, también se ha demostrado que las propiedades dinámicas de las estructuras son directamente afectadas y sensibles a las condiciones climatológicas de su entorno [Delgadillo Ayala, 2017]. En el estudio hecho por Delgadillo Ayala (2017) se demostró que el aumento de la temperatura climatológica provoca un aumento en la temperatura de los materiales de la estructura, dilatándolos y provocando una disminución de su frecuencia natural y consecuentemente de su rigidez.

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el mes de junio de 2024 obtuvo temperaturas máximas de 32 °C y una media de 27.5 °C, mientras que el mes de julio bajo la temperatura obteniendo máximas de 25 °C y una media de 20 °C, cabe señalar que el Museo al estar entre dos avenidas muy concurridas a lo largo del día produce que el entorno tenga una percepción térmica mayor debido al tráfico vehicular que existe. Así mismo, tomemos en cuenta que la iglesia está en actividad constante, igualmente las actividades en el Museo tienen horarios de 10:00 a 18:00 horas, por lo tanto, la carga estructural en el edificio administrativo y la iglesia está presente durante el día.

En cuanto a la amplitud de las frecuencias en las figuras 5.13 y 5.14 es importante señalar que las amplitudes máximas ocurren durante los días y son mínimas durante las noches. Lo anterior tiene sentido debido a que las amplitudes están relacionadas con la intensidad de las vibraciones de las estructuras, es decir, durante los días está más presente debido al flujo de personas donde las pisadas, movimiento de empleados y visitantes generan vibraciones en la estructura, así mismo el ruido ambiental de las dos avenidas en las que se encuentra el Museo pueden contribuir en este aumento de la amplitud de las vibraciones en las estructuras.

De los resultados anteriores, se puede decir que la frecuencia natural tanto del costado de la cupula como del edificio administrativo tiene variaciones debido a dos causas principales: la carga estructural y las condiciones climatológicas. De este modo se explica que las estructuras estudiadas tienen una disminución de su frecuencia natural debido a que los materiales que constituyen son capaces de almacenar el calor y produciendo una pérdida de rigidez, mientras que por las noches las estructuras sufren un enfriamiento aumentando la frecuencia natural y la rigidez. Todo lo mencionado anteriormente es favorecido por la carga estructural

presente durante los días y ausente en las noches.

Por otro lado, la estación ubicada en el sótano muestra un patrón menos claro (Figura 5.15), siguiendo una tendencia más plana en cuanto a la frecuencia que presenta. Esto podría deberse a su cercanía con el suelo, donde predominan principalmente las propiedades del área de estudio y a un mayor acoplamiento con el terreno natural.

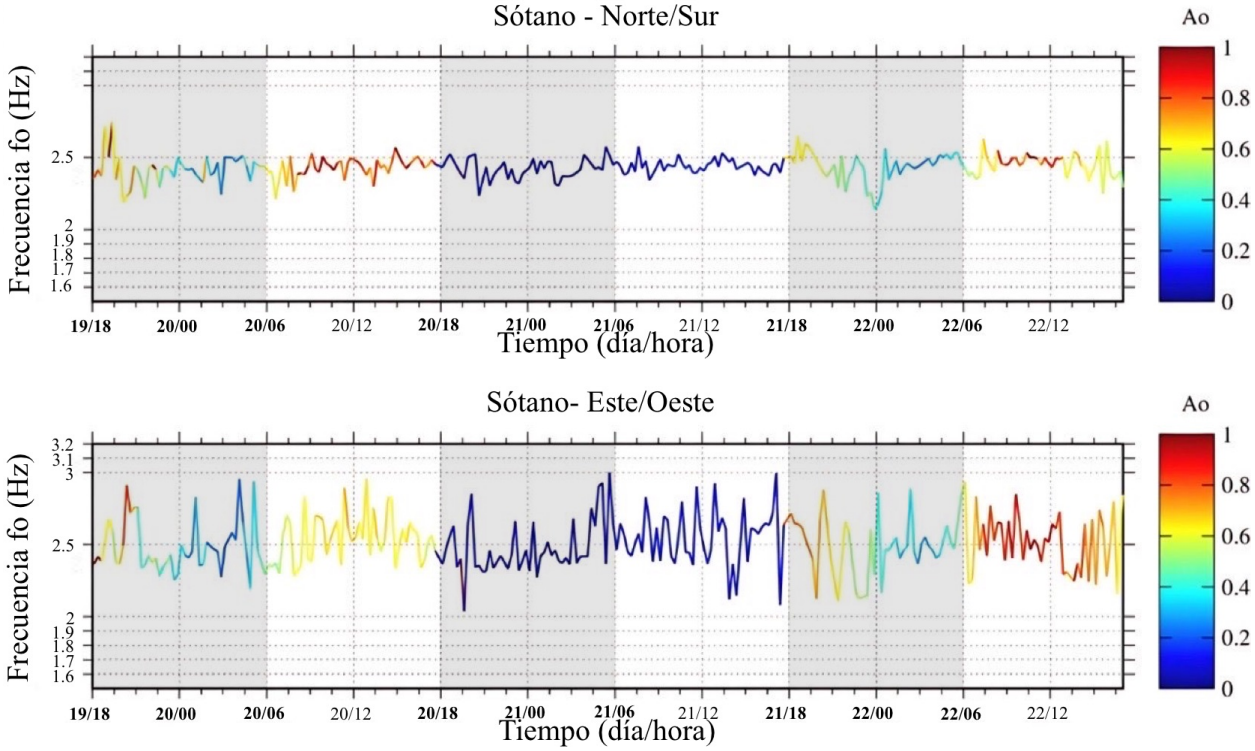


Figura 5.15: Evolución de la frecuencia natural en la estación ubicada en el Osario.

La función de transferencia de un edificio es una forma importante de conocer la respuesta dinámica que tendrá el edificio ante excitaciones sísmicas. Dicha función de transferencia se calculó mediante el cociente espectral entre la componente Norte-Sur de la estación ubicada en el piso más alto del edificio y la componente Norte-Sur de la estación ubicada en el sótano, que corresponde al Osario. Este mismo análisis se realizó entre las componentes de la estación a un costado de la iglesia y el Osario. Con este análisis, se puede identificar la frecuencia en la que el edificio amplifica las vibraciones externas, lo cual es importante para estudiar su vulnerabilidad sísmica.

Recordemos que la función de transferencia del edifico y el costado de la cupula reflejaría está comparando la respuesta que se tiene en la respectiva estructura con el Osario, lo que permite

entender cómo se atenúan, amplifican y comportan las vibraciones a lo largo de la estructura.

En la Figura 5.16 se observa que la evolución de la frecuencia dominante de la función de transferencia del edificio administrativo presenta un comportamiento muy similar al de las imágenes anteriores. Asimismo, se puede notar que la frecuencia dominante de la función de transferencia es muy similar a la analizada en el segundo nivel del edificio administrativo, lo que sugiere que la vibración del edificio está fuertemente controlada por la respuesta de dicho nivel. De igual forma, se puede afirmar que la mayor amplificación de la función de transferencia en esta frecuencia implica que el segundo nivel del edificio administrativo es el que experimenta en mayor medida los efectos dinámicos de la estructura.

Por otro lado, en la función de transferencia se observa que la amplitud de la frecuencia dominante no presenta una variación cíclica, como en las imágenes anteriores, donde se apreciaba que el edificio tenía un nivel de excitación dependiente del tiempo, sino que se mantiene más constante a lo largo del tiempo. Lo anterior sugiere que la estabilidad de la amplitud en la función de transferencia indica que las proporciones de amplificación entre el último piso del edificio y el Osario son consistentes.

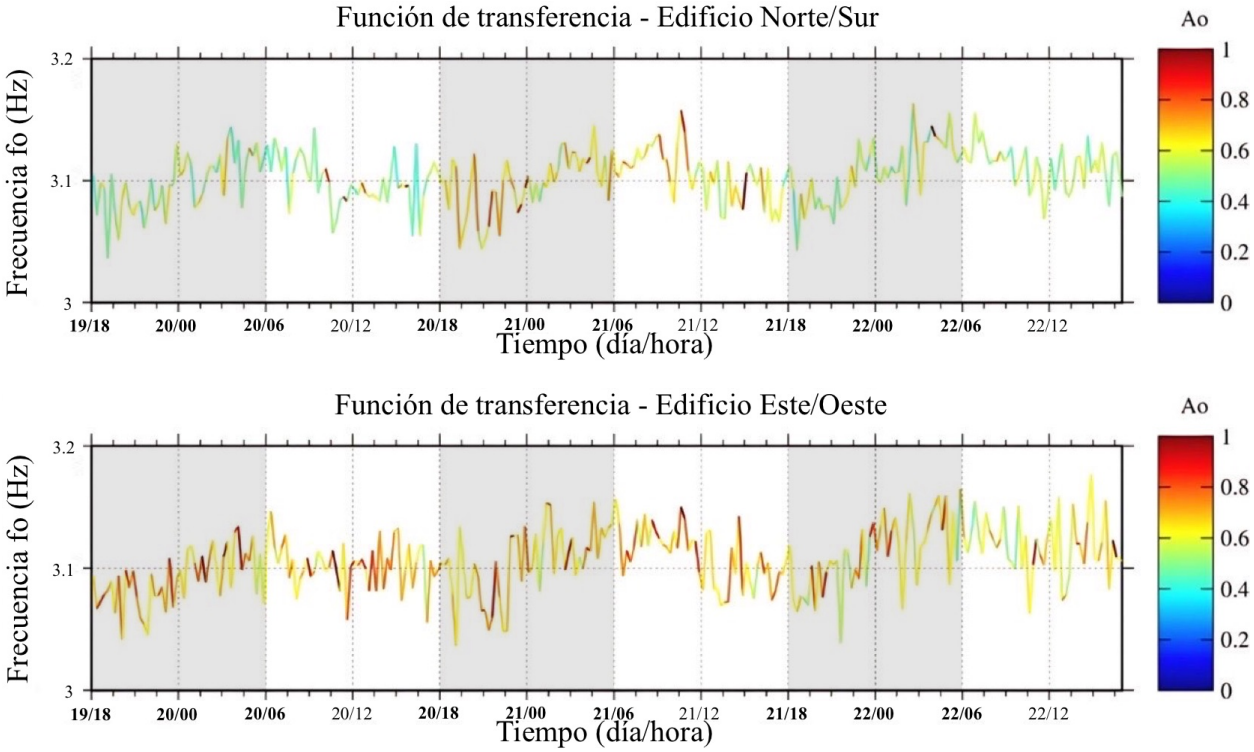


Figura 5.16: Función de transferencia entre el ultimo nivel del edificio administrativo y el Osario. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día

Para el caso de la estación ubicada junto a la cúpula de la iglesia, la función de transferencia (Figura 5.16) también es muy similar a las gráficas analizadas utilizando únicamente las componentes de la estación ubicada a un costado de la cupula de la iglesia del Carmen.

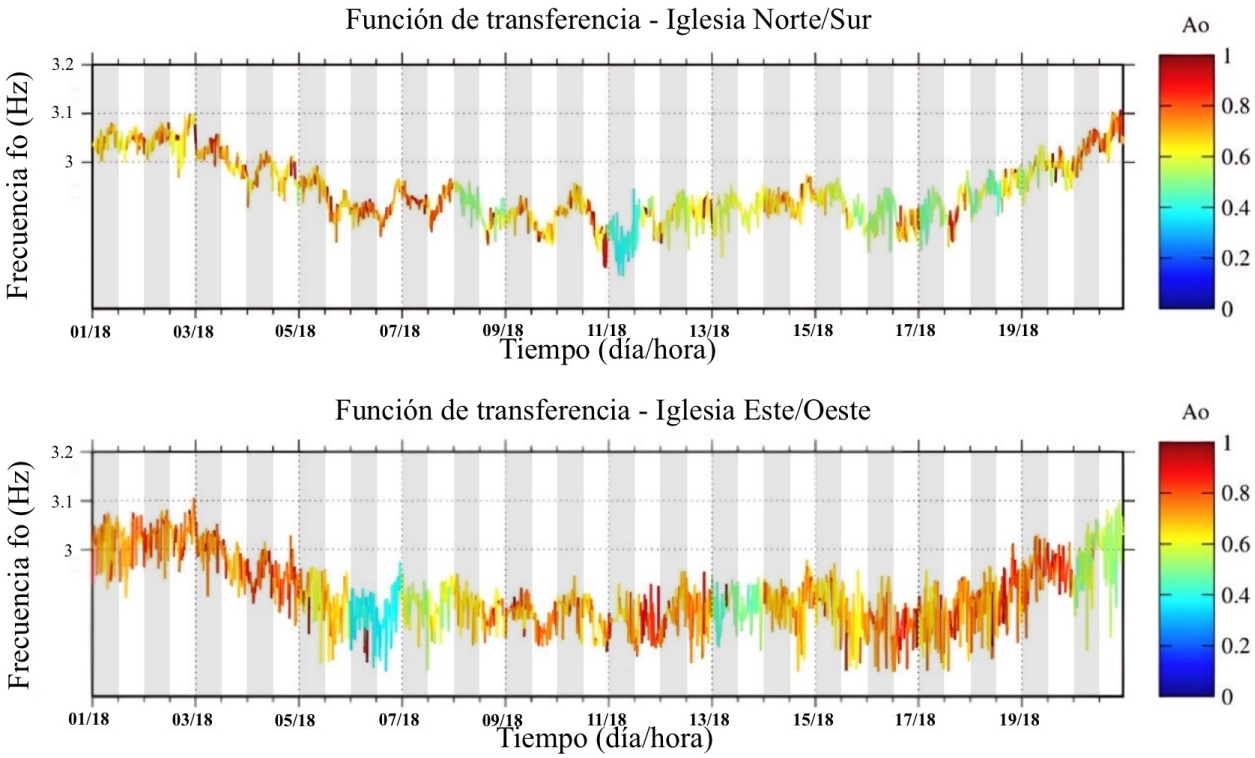


Figura 5.17: Función de transferencia entre el costado de la cupula de la iglesia y el Osario. Los recuadros grises indican el periodo de noche y los blancos el periodo de día

En las figuras 5.16 y 5.17 se observa que, particularmente, las funciones de transferencia con orientación Este-Oeste presentan amplificaciones relativas que se mantienen de forma constante por encima de 0.7 durante la mayor parte del tiempo. Considerando que la función de transferencia se obtiene como el cociente espectral entre la estación ubicada junto a la cúpula de la iglesia o el edificio administrativo y la estación situada en el Osario, se puede inferir que las vibraciones registradas en las estaciones del segundo nivel del edificio administrativo y en la ubicada junto a la iglesia poseen mayor energía. Esto sugiere que ambas estructuras amplifican las vibraciones que se propagan desde el Osario, lo cual podría representar un riesgo considerable en caso de un evento sísmico.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

La tesis realiza un análisis del estado del Museo del Carmen, considerando tanto su estructura como el tipo de suelo en el que está construido. Se destaca que las técnicas modernas de monitoreo de estructuras y análisis del terreno son muy útiles para proteger sitios de valor histórico, ayudando a las autoridades a tomar decisiones informadas para su conservación.

El estudio revela que el subsuelo del museo está compuesto por tres capas principales. La capa superior, cercana a la superficie, presenta características que indican suelos poco resistentes y mal compactados, posiblemente afectados por agua, y está formada por depósitos de arcillas blandas y arenas sueltas. La segunda capa es más rígida, con mayor compactación y materiales más densos, mientras que la capa más profunda es aún más compacta y estable, con buena resistencia estructural.

El análisis de los cocientes espectrales indica que el terreno donde se ubica el museo es de transición, con una frecuencia fundamental de 1.3 Hz en estaciones sobre terreno libre, lo que confirma la presencia de suelo blando en la zona. Además, los estudios de inversión de datos muestran que el suelo en el área del museo tiene características que favorecen el comportamiento de suelos blandos.

El monitoreo sísmico fue fundamental para entender cómo reaccionan las estructuras del museo ante movimientos sísmicos. Se observó que el edificio administrativo y la cúpula de la iglesia presentan cambios en su frecuencia natural, lo que indica una cierta inestabilidad y pérdida de rigidez con el tiempo, influenciada por cargas, condiciones climáticas y

la actividad diaria en el edificio. Estos cambios en la frecuencia natural están relacionados con variaciones en la rigidez, que pueden causar deformaciones y grietas en muros, vigas o columnas, ya existentes en el edificio.

Además, se identificó que factores externos como la temperatura y la cantidad de personas en el edificio afectan su comportamiento estructural, ya que la frecuencia natural disminuye durante el día (a mayor actividad y cargas) y aumenta en la noche, cuando la actividad disminuye. Esto indica una fluctuación en la rigidez estructural que, si continúa, podría afectar la estabilidad del edificio y su respuesta ante un sismo, provocando movimientos internos mayores.

El simple hecho de que la rigidez disminuya en ciertos periodos de tiempo provoca que la estructura experimente mayores desplazamientos y deformaciones, lo que puede generar grietas en muros, vigas o columnas. De hecho, el Museo del Carmen ya presenta estos fenómenos en su estado actual.

El análisis de la función de transferencia mostró que, aunque la relación entre las estaciones de medición se mantiene estable, la amplitud varía a lo largo del día, reflejando cambios en la rigidez del edificio. Sin embargo, la relación de amplificación entre la base y los niveles superiores sigue siendo fuerte, lo que sugiere que la estructura aún no presenta daños severos.

Este tipo de estudios no se habían realizado previamente en el Museo del Carmen, por lo que se enfatiza la importancia de realizar monitoreos continuos para detectar y prevenir deterioros graduales en las estructuras, que forman parte del patrimonio cultural. Los resultados indican que, en general, la estructura mantiene su integridad, pero si en futuros análisis se detecta una disminución en la frecuencia natural, como en el caso del edificio administrativo, sería necesario implementar medidas para evitar un daño mayor y garantizar su estabilidad a largo plazo.

Bibliografía

[Cervantes-Solano et al., 2019] Cervantes-Solano, M., Cifuentes-Nava, G., Caballero-Miranda, C. I., Goguitchaichvili, A., López-Loera, H., Delgado-Granados, H., Morales-Contreras, J., and Urrutia-Fucugauchi, J. (2019). Estudio magnético integral de flujos de lava del volcán Xitle: Implicaciones arqueológicas sobre el abandono de Cuicuilco. *Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana*, 71(2):397–411.

[Choon, 2015] Choon, P. (2015). PS User Guide Series Passive MASW Data Acquisition and Processing. Technical report.

[Claerbout, 1968] Claerbout, J. F. (1968). Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *GEOPHYSICS*, 33(2):264–269.

[D'Amico, 2013] D'Amico, S. (2013). *Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering*, volume 10. InTech, Rijeka, Croatia, first edition.

[Delgadillo Ayala, 2017] Delgadillo Ayala, R. M. (2017). *Evaluación de la Influencia de los Factores Ambientales en las Propiedades Dinámicas de Sistemas Estructurales de Tierra.* PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

[Farah Binti Hussin et al., 2016] Farah Binti Hussin, S., Binti Hamid, Z., and Gauri, B. (2016). Design of Butterworth Band-Pass Filter. *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology*, 1:128–2883.

[Ferrari, 2000] Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1):84–92.

[Gaffney et al., 2003] Gaffney, C., Gater, J., and Aston, M. (2003). *Revealing The Buried Past Geophysics For Archaeologists*, volume I. The History Press, England, first edition.

[Gaite Castrillo, 2013] Gaite Castrillo, B. (2013). *Análisis y aplicaciones del ruido sísmico en México, Golfo de México y Caribe: tomografía de ondas superficiales Rayleigh y Love*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.

[Giolo et al., 2019] Giolo, E., Clderón, F., Pagano, S., Vía Gatica, S., and Frau, C. (2019). La técnica H/V como herramienta para la determinación de estructuras ciegas. Un caso de estudio de la Ciudad de Mendoza, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, pages 55–67.

[Gobierno de la Ciudad de México, 2020] Gobierno de la Ciudad de México (2020). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Alcaldía Álvaro Obregón*, volume 1. Ciudad de México, primera edition.

[Gómez-Tuena et al., 2005] Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., and Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII:227–283.

[Gouédard et al., 2008] Gouédard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., Colin De Verdière, Y., Larose, E., Margerin, L., Roux, P., Sánchez-sesma, F. J., Shapiro, N. M., and Weaver, R. L. (2008). Cross-correlation of random fields: Mathematical approach and applications. *Geophysical Prospecting*, 56(3):375–393.

[Granados et al., 2019] Granados, I., Calo, M., and Ramos, V. (2019). Noise Curve Dispersion Picking.

[Gutiérrez Martínez et al., 2006] Gutiérrez Martínez, C. A., Martínez Bringas, A., Gómez Vázquez, , Servando De la Cruz, R., Martínez Bringas, A., Hernández Alcántara, T., Mendoza López, M. J., and Domínguez Morales, L. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. CENAPRED, Ciudad de México, i edition.

[Konno and Ohmachi, 1998] Konno, K. and Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1):228–241.

[Kramer, 1996] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 1 edition.

[Lermo Samaniego et al., 2020] Lermo Samaniego, J. F., Sanchez-Sesma, F. J., Ramos Pérez, E., Monroy, I. , Jiménez Méndez, N., Torres Cuenca, R., Machado González, O. R., Cruz, I. L., Crespo Gonzalez, N., Maldonado, D. L., Huerta Espinoza, O., Yehemi, K., González, C., De, T., Israel, J., Cruz, L., Lorenzo González, H., Fernando, J., Aragon, P., Félix, J., and Méndez, L. (2020). Actualización de la zonificación sísmicas de la Ciudad de México y áreas aledeñas-Parte Norte. Technical report, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México.

[López Martínez, 2024] López Martínez, L. A. (2024). *Estudio geofísico de resistividad para la caracterización hidrogeológica del subsuelo en el Bosque de Chapultepec de la Ciudad de México.* PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

[Lugo-Hubp, 1990] Lugo-Hubp, J. (1990). Mapa Geomorfológico del Occidente de la Cuenca de México. *Investigaciones Geográficas*, pages 1–19.

[Martínez González, 2015] Martínez González, J. A. (2015). *Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores, para fines de mapas sísmicos de intensidad.* PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

[Mehmet Çelebi, 2000] Mehmet Çelebi, B. (2000). Seismic Instrumentation of Buildings. Technical report, USGS.

[Mooser, 2018] Mooser, F. (2018). *Geología del Valle de México y otras regiones del país*, volume I. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C., Ciudad de México.

[Naghadeh and Morley, 2017] Naghadeh, D. H. and Morley, C. K. (2017). Enhancement of temporal resolution using improved time-variant spectral whitening. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4):822–832.

[Ogura and Soares Macedo, 2005] Ogura, A. and Soares Macedo, E. (2005). Procesos y riesgos geológicos. *Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental.*

[Ólafsdóttir et al., 2018] Ólafsdóttir, E., Bessason, B., and Erlingsson, S. (2018). Herramienta para el análisis de datos de campo del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y la evaluación de perfiles de velocidad de ondas transversales en suelos.

[Ortiz et al., 2012] Ortiz, A. R., Gómez, D., and Thomson, P. (2012). Efectos de la interacción humano-estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna. *Ingeniería y Competitividad*, 14(1):63–73.

[Piña Flores and García Jerez, 2018] Piña Flores, J. and García Jerez, A. (2018). HV-Inv.

[Ramirez Camargo and Bosch, 2013] Ramirez Camargo, A. R. and Bosch, M. (2013). Inversión sísmica y petrofísica utilizando el método de optimización. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 28(2):53–64.

[Ruiz Rivera, 2012] Ruiz Rivera, N. (2012). La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, pages 63–74.

[Ruiz Rivera et al., 2015] Ruiz Rivera, N., Casado Izquierdo, J. M., and Sánchez Salazar, M. T. (2015). Los Atlas de Riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(88):146–162.

[Stehly et al., 2006] Stehly, L., Campillo, M., and Shapiro, N. M. (2006). A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(10):1.

[Tapia-Varela and López-Blanco, 2002] Tapia-Varela, G. and López-Blanco, J. (2002). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1):50–65.

[Thomas Schuster, 2009] Thomas Schuster, G. (2009). *Seismic Interferometry*. Cambridge University Press, 1 edition.

[Vargas Zamudio, 2019] Vargas Zamudio, K. A. (2019). *Inversión Conjunta de Datos de Métodos Potenciales*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

[Vazquez and Jaimes, 1989] Vazquez, E. and Jaimes, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28:134–190.

[Wathelet et al., 2020] Wathelet, M., Chatelain, J., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M., and Savvaidis, A. (2020). Geopsy: Un conjunto de herramientas de código abierto fácil de usar para el procesamiento de vibraciones ambientales.

[Xie et al., 2020] Xie, J., Yang, Y., and Luo, Y. (2020). Improving cross-correlations of ambient noise using an rms-ratio selection stacking method. *Geophysical Journal International*, 222(2):989–1002.

[Zamorano Orozco et al., 2025] Zamorano Orozco, J. J., Peralta Higuera, A., Quijada Mendoza, I., Garnica Peña, R. J., Rosales Tapia. Ana Rosa, Contreras Estrada, L. A., Velázquez Quintana, M. S., Velázquez Romero, D. I., Morales Reygadas, S., and Salvador Guzmán, L. E. (2025). Estrategia integral de intervención territorial sustentable [Manuscrito no publicado]. Technical report, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

[Zeng and Thurber, 2016] Zeng, X. and Thurber, C. H. (2016). A Graphics Processing Unit Implementation for Time-Frequency Phase-Weighted Stacking. *Seismological Research Letters*, 87(2A):358–362.

[Zorilla C., 2019] Zorilla C., G. G. (2019). *Desarrollo e implementación de un algoritmo para la inversión estocástica de un perfil magnético*. PhD thesis, Universidad Central de Venezuela.